



Tero Taivassalo

Maalaserkeilauksen soveltaminen puuston arvonmäärityksessä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo, Elokuu 2017

Valvoja: Professori Henrik Haggrén

Ohjaajat: Professori Matti Vaaja, DI Arttu Julin

Tekijä Tero Taivassalo

Työn nimi Maalaserkeilauksen soveltaminen puuston arvonmäärityksessä

Koulutusohjelma Geomatiikka

Pääaine Fotogrammetria ja kaukokartoitus

Koodi M3006

Työn valvoja Professori Henrik Haggrén

Työn ohjaaja(t) Professori Matti Vaaja, DI Arttu Julin

Päivämäärä 14.8.2017

Sivumäärä 48

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tutkimuksen tärkein tavoite on selvittää maalaserkeilauksen sovellettavuutta ja luotettavuutta metsän arvioinnissa. Diplomityön teoriaosan aiheina ovat puuston maalaserkeilaus ja yleisimpien metsän arviointimenetelmien perusteet. Työn soveltavassa osassa käytettiin maalaserkeilaimella mitattuja aineistoja, joiden avulla demonstroitiin arviointiprosessi kokonaisuudessaan.

Työssä käytettiin kahden puun, koivun ja männyn, maalaserkeilauksen tuloksia. Puut oli mitattu sekä tyynellä että tuulisella säällä. Molempien puiden runkojen kokonaistilavuus laskettiin valituilla korkeustasoilla määritettyjen halkaisijoiden perusteella. Tuulen vaikutuksen selvittämiseksi tuloksia vertailtiin tuuliolosuhteiden mukaan.

Työssä havaittiin, että maalaserkeilaukseen perustuvaan puun rungon tilavuuden määrittämenetelmään sisältyy merkittäviä epävarmuuksia. Rungon tilavuus voidaan määrittämään luotettavasti noin kahdeksan metrin korkeuteen asti, kun puun korkeus on 15 m. Puun rungon muodon määrittäminen vaikeutuu erityisesti oksista ja puun lehdistä aiheutuvien katveiden vuoksi. Koivun tilavuus on tuulisella säällä tehtyjen mittausten tuloksista määritettynä suurempi kuin tyynen sään aineistosta saadaan, mutta männyn tilavuudessa ero on päinvastoin. Koska määritettyjen halkaisijoiden epävarmuuksista aiheutuva runkojen kokonaistilavuuksien epävarmuus on ainakin samaa suuruusluokkaa kuin tuloksena saatu tuulen vaikutus määritettyihin tilavuuksiin, tuulen vaikutusta laserkeilauksen aineistojen avulla määritettyyn runkojen kokonaistilavuuteen ei tässä työssä käytettävissä olleen mittausaineiston perusteella voida arvioida.

Kuvitteellisen metsäkiinteistön puuston arvo laskettiin sekä summa-arvo- että tuottoarvomenetelmillä keilatuille puille määritettyjen tilavuuksien ja markkinahintojen perusteella. Tuulen vaikutus on ennako-odotuksia heikompi. Tuulisen sään mittausaineistolla puuston arvoksi saadaan vain 1,7 prosenttia pienempi kuin tyynen sään aineistolla. Toisaalta koivujen kokonaisarvo on 5,0 prosenttia suurempi tuulisen kuin tyynen sään aineiston perusteella. Sen sijaan männyn arvo on 4,2 prosenttia pienempi tuulisen kuin tyynen sään mittausaineistojen perusteella. Tuottoarvomenetelmällä puuston kokonaisarvoksi saadaan 4–8 prosenttia suurempi arvo kuin summa-arvomenetelmällä.

Avainsanat Maalaserkeilaus, metsänarviointi, tuulen vaikutus, puun rungon tilavuus



Author Tero Taivassalo		
Title of thesis Applying terrestrial laser scanning on forest valuation		
Degree programme Degree Programme in Geomatics		
Major Photogrammetry and Remote Sensing		Code M3006
Thesis supervisor Professor Henrik Haggrén		
Thesis advisor(s) Professor Matti Vaaja, M.Sc.(Tech) Arttu Julin		
Date 14.8.2017	Number of pages 48	Language Finnish

Abstract

The main goal of this study is to examine the performance of terrestrial laser scanning in forest valuations. Principles of the terrestrial laser scanning and alternative methods commonly applied in forest property valuations are introduced. Selected data from terrestrial laser scanning measurements are used in demonstrating the process of forest property valuation.

This study utilizes results of terrestrial laser scanning measurements of two trees, a pine and birch. The measurements had been carried out in windy and windless weather conditions. The total volume of the studied trees was calculated from the stem diameter determined for chosen height levels. The influence of wind on the volume of trees is examined by comparing results for different weather conditions.

Terrestrial laser scanning based determination of the volume of a tree stem is found to include significant inaccuracies. The accuracy of the tree volume determination is satisfactory up the height of 8 m for a 15 m high tree. Higher up point clouds disintegrate and the determination of the stem diameter is difficult. The total volume of the birch tree was obtained higher for windy than windless weather conditions but opposite for the pine tree. The uncertainties in the determined stem diameters introduce uncertainties in the calculated total tree stem volumes, which are at least as large as the differences in the total stem volume obtained for windy and windless weather conditions. Accordingly, the influence of wind on the determination of the total volume of the tree stems cannot be evaluated on the basis of the laser scanning data used in this study.

The valuation of an imaginary forest property is performed with two valuation methods, the summation and income methods, by using information from the determined volumes of the two tree and forest market. The influence of wind is weaker than expected. The difference in the value of the trees in windless and wind weather conditions is only 1.7 percent. However, the value of birch trees is 5.0 percent higher in windy than windless weather conditions, but the influence of wind is opposite for pine trees. When applying the income method, the total value of the forest property is 4 to 8 percent higher than for the summation method.

Keywords Terrestrial laser scanning, forest valuation, influence of wind, volume of tree stems

Alkusanat

Diplomityössäni halusin yhdistää jollain tavalla pääaineeni fotogrammetrian ja sivuai-
neeni kiinteistötekniikan opinnot. Aiheen valinnassa tarvittiin lopulta hieman ohjaajien
apua, sillä alkuperäinen ideani osoittautui alkuneuvottelussa liian työlääksi ja vaikeaksi
toteuttaa. Varsinainen haaste oli määrittää yhteys mittausaineistosta saadun puuston
tilavuuden ja laskettavan puuston arvon välille, mikä teki työstäni myös mielenkiintoi-
sen. Kirjallisuustutkimuksen jälkeen edellä mainittu tutkimusongelma oli helpompi
hahmottaa, ja oikea suunta löytyi. Lisäksi opin esimerkiksi analysoimaan maalaserkei-
lausaineistoja.

Kiitän työni valvojaa professori Henrik Haggrénia sekä ohjaajiani Matti Vaajaa ja Arttu
Julinia ohjauksesta projektin aikana. Kiitokset myös niille Rakennetun ympäristön lai-
toksen henkilöille, joilta sain tarvittaessa apua keilausaineiston käsittelyssä. Lisäksi kii-
tän vanhempiani, muita lähisukulaisiani ja ystäviäni sekä kannustuksesta että tuesta
opintojeni aikana. Erityiskiitokset isälleni, joka toisen teknillisen alan kokeneena tutki-
jana antoi minulle arvokkaita neuvoja tutkimustyöni edetessä.

Espoossa 14.8.2017

Tero Taivassalo

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Kuvaluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3	Tutkimusaiheen rajaus	2
1.4	Tutkimusaineisto ja -menetelmät	2
2	Metsän maalaserkeilaus	3
2.1	Maalaserkeilauksen toimintaperiaate	3
2.1.1	Mittauskuviot	4
2.1.2	Etäisyyden määrittäminen	4
2.1.3	Mittausaineistojen rekisteröinti	5
2.2	Soveltamiskohteet metsien kartoituksessa	6
2.3	Puun rungon tilavuuden määrittäminen	8
2.4	Tuulen vaikutus	10
3	Metsänarviointi	14
3.1	Arviointimenetelmät	14
3.1.1	Tuottoarvomenetelmä	15
3.1.2	Summa-arvomenetelmä	16
3.1.3	Kauppa-arvomenetelmä	17
3.2	Puuston tilavuuden arviointi	18
4	Puuston arvonmääritys maalaserkeilausaineistolla	20
4.1	Tutkimusasetelma	20
4.2	Mittaukset	21
4.3	Mittausaineiston analysointi	22
4.4	Puuston arvon laskeminen	26
5	Tulokset	27
5.1	Puiden tilavuus	27
5.1.1	Rungon halkaisija	27
5.1.2	Rungon tilavuus	31
5.1.3	Rungon tilavuuden määrittystarkkuus	35
5.2	Kiinteistön puuston arvo	40
5.3	Vaikutukset metsän arvoon	41
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	42
	Lähdeluettelo	45

Kuvaluettelo

Kuva 1	Maalaserkeilauksen toimintaperiaate ja kupolimaisen mittauskuvion havainnollistus.
Kuva 2	Pulssilaserin toimintaperiaate.
Kuva 3	Vaihe-erolaserin toimintaperiaate.
Kuva 4	Maalaserkeilatun puun 3D-mallinnuksen viisi erilaista tarkkuustasoa.
Kuva 5	Tuulen vaikutus männyn rungon maalaserkeilaukseen.
Kuva 6	Mittausaineistoon sovitetusta ympyrästä laskettu männyn halkaisija eri korkeuksilla ja mittausasetelmissa, kun keskituuli oli 3 (alempi) ja 9 m/s (ylempi).
Kuva 7	Männyn rungosta mitattujen pisteiden etäisyyksien keskihajonta sovitetun ympyrän keskipisteestä, kun keskituuli oli 3 (alempi) ja 9 m/s (ylempi).
Kuva 8	Männyn runkoon sovitettujen ympyröiden keskipisteiden keskimääräinen etäisyys toisistaan kolmen eri mittauksen välillä ja eri korkeuksilla, kun keskituuli oli 3 ja 9 m/s.
Kuva 9	Metsän arviointimenetelmän valinta.
Kuva 10	Tuottoarvomenetelmän periaate.
Kuva 11	Metsän arvonnäätitys summa-arvomenetelmällä.
Kuva 12	Kartta koealueesta.
Kuva 13	Koejärjestely yhden keilauksen aikana (vrt. kuva 12).
Kuva 14	Mittausaineiston jälkikäsitteilyn prosessikaavio.
Kuva 15	Rekisteröintitulokset tyynellä säällä mitatuille pisteille SCENE-ohjelmalla.
Kuva 16	Rekisteröintitulokset tuulisella säällä mitatuille pisteille SCENE-ohjelmalla.
Kuva 17	Laserkeilattu mänty visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla (ylhäältä päin katsottuna).
Kuva 18	Koivun runko tuulisella (vasemmalla, suurempi pistekoko) ja tyynellä (oikealla) säällä mitattujen aineistojen perusteella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla.
Kuva 19	Männyn runko tuulisella (oikealla, suurempi pistekoko) ja tyynellä (vasemmalla) säällä MicroStation-ohjelmistossa.
Kuva 20	Maalaserkeilauksen mittauksista määritetty ja mittanauhalla mitattu männyn halkaisija korkeuden funktiona.
Kuva 21	Maalaserkeilauksen mittauksista määritetty ja mittanauhalla mitattu koivun halkaisija korkeuden funktiona.
Kuva 22	Mitatun koivun yläosa alapuolelta kuvattuna.
Kuva 23	Vanhan vaurion aiheuttama kolo mitatun männyn rungossa.
Kuva 24	Mitatun koivun rungon alaosa.
Kuva 25	Tuulen vaikutus männyn halkaisijaan korkeuden funktiona.
Kuva 26	Tuulen vaikutus koivun halkaisijaan korkeuden funktiona.
Kuva 27	Mittauksien väliin jäävän männyn rungon osan tilavuus pituusyksikköä kohti korkeuden funktiona.
Kuva 28	Mittauksien väliin jäävän koivun rungon osan tilavuus pituusyksikköä kohti korkeuden funktiona.
Kuva 29	Männyn tilavuus mittauksen alapuolella korkeuden funktiona.
Kuva 30	Koivun tilavuus mittauksen alapuolella korkeuden funktiona.
Kuva 31	Tuulen vaikutus mittauksen alapuolelle jäävän männyn rungon tilavuuteen korkeuden funktiona.

- Kuva 32 Tuulen vaikutus mittaustason alapuolelle jäävän koivun rungon tilavuuteen korkeuden funktiona.
- Kuva 33 Männyn rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus korkeuden funktiona, kun jokaisen halkaisijan määrittelyn epävarmuudeksi oletetaan 3 cm.
- Kuva 34 Koivun rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus korkeuden funktiona, kun jokaisen halkaisijan määrittelyn epävarmuudeksi oletetaan 5 cm.
- Kuva 35 Koivun rungon poikkileikkaus ja määritetty halkaisija kolmella eri korkeudella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla tyynellä ja tuulisella säällä mitatusta aineistosta.
- Kuva 36 Männyn rungon poikkileikkaus ja määritetty halkaisija kolmella eri korkeudella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla tyynellä ja tuulisella säällä mitatusta aineistosta.

1 Johdanto

Tämä johdantoluku esittelee diplomityön aiheen ja antaa taustatietoja tutkimuksesta. Alalukujen aiheina ovat tutkimuksen tausta, tutkimusongelma, tutkimusaineisto ja -menetelmät sekä tutkimuksen raja-
aus.

1.1 Tutkimuksen tausta

Metsän arvioinnilla tarkoitetaan metsäomaisuuden arvonmäärittystä, jota tarvitaan esimerkiksi myyntitilanteissa. Tärkein arviointimenetelmä on summa-arvomenetelmä, jossa puuston ja maapohjan arvo lasketaan erikseen. Maapohjan arvo on yleensä laskettu Tapion hintataulukoista sijainnin ja metsätyyppin perusteella (Paananen ym., 2009). Puuston arvo määritetään metsäsuunnitelmasta saatavista tiedoista. Yleensä metsäsuunnitelmassa puuston kokonaismäärä perustuu pieniin otantoihin puustosta. Harvoin on mitattu kaikkia yksittäisiä puita erikseen, koska tällainen työläs menetelmä vaatisi aikaa. Lisäksi puiden yksinluku ei ole kustannustehokas menetelmä.

Puuston arviointiin liittyvää ongelmaa on pyritty aikaisemmin ratkaisemaan esimerkiksi Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa. Johan Holmgrenin väitöskirjassa (Holmgren, 2003) vertailtiin ilmalaserkeilausmittausten ja relaskooppiarviointien tuloksia. Vaikka relaskooppimittaukset pyrittiin tekemään tutkimusasetelman vuoksi huolellisesti, niidenkin tulos sisältää virhettä. Holmgrenin tutkimuksen tulosten mukaan ilmalaserkeilauksessa puiden luokittelu onnistuu luotettavasti, mutta keilauksella määritetyn puuston määrä poikkesi huomattavasti relaskooppiarviointien tuloksista ja poikkeamat vaihtelivat metsän rakenteen mukaan. Laserkeilaus aliarvioi puuston määrää eniten metsissä, joissa oli matalia puita. Lisäksi keilauskulma vaikutti merkittävästi puiden määritettyyn korkeuteen.

Laserkeilaukseen perustuvat mittausten menetelmät ja -laitteet ovat kehittyneet huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana (Barrile ym., 2016). Tavallisten paikalleen sijoitettavien keilainten rinnalle on tullut muun muassa selässä kannettavia laserkeilaimia, joilla kävellään keilattava alue läpi. Lisäksi on kehitetty erilaisia mobiililaserkeilaimia, joilla kyetään keilaamaan esimerkiksi joen rantaa veneestä (Vaaja, 2010; Alho ym., 2009). Aivan uusia mahdollisuuksia ovat luoneet erityisesti pienoislennokit (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), joihin voidaan kiinnittää myös laserkeilain (Barrile ym., 2016). Lennokeilla voidaan mitata myös rajamerkkejä ilman merkittäviä lisäkustannuksia.

Aikaisemmat puiden maalaserkeilaukseen liittyvät tutkimukset ovat pääasiassa keskittyneet puun 3D-mallintamiseen ja erilaisten ominaisuustietojen mittaamiseen (Holmgren, 2003; Krooks, 2012.; Liang ym., 2016; Vaaja ym., 2016; Zhang ym., 2016). Laserkeilauksen soveltamista puuston arvonmäärittämisessä on selvitetty aikaisemmin esimerkiksi Holopaisen ja Viitasen (2011) tutkimuksessa. Tämä diplomityö täydentää näitä tutkimuksia keskittymällä eri tuuliolosuhteissa tehtyjen maalaserkeilausten tulosten käyttöön puiden tilavuuden ja edelleen eri menetelmillä tehtyihin puuston arvonmäärittäisiin.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Työn tavoitteena on ratkaista seuraava pääongelma:

Miten maalaserkeilaukseen perustuvalla mittausmenetelmällä voidaan määrittää luotettavasti sekä yksittäisen puun tilavuus että puuston arvo?

Pääongelma on jaettu seuraaviin tarkentaviin alakysymyksiin:

1. Miten puun tilavuus määritetään maalaserkeilauksella?
2. Miten puiden tilavuuden avulla lasketaan puuston arvo?
3. Miten arviointimenetelmän valinta vaikuttaa puuston arvoon?
4. Miten tuuli vaikuttaa mittaustuloksiin ja puuston arvoon?

Tutkimusongelma johtaa tavoitteeseen. **Tavoitteena on selvittää maalaserkeilaukseen perustuvan mittausmenetelmän luotettavuus puuston arvonmäärittämisessä.** Lisäksi nykyisiä arviointimenetelmiä vertaillaan toisiinsa tulosten perusteella.

1.3 Tutkimusaiheen raja

Tämä tutkimus keskittyy maalaserkeilausta soveltavan mittausmenetelmän käyttömahdollisuuksiin puuston arvonmäärittämisessä. Tässä diplomityössä ei käsitellä laserkeilausta muista näkökulmista eikä myöskään tarkastella niihin liittyviä asioita. Tutkimuksen ulkopuolelle jäävät myös muun muassa kolmiulotteisiin malleihin perustuvat jatkoanalyysimenetelmät ja muut yleisesti kartoitukseen liittyvät asiat kuten mittauslaitteiden kalibrointi sekä erilaiset kuvien orientointimenetelmät.

Diplomityö rajataan käsittelemään ainoastaan puuston arvonmäärittäystä maalaserkeilausaineiston perusteella. Työssä ei käsitellä muiden fotogrammetristen tai osittain fotogrammetriaa soveltavien mittausmenetelmien soveltuvuutta biomassan määrittämiseen. Metsän maapohjan arvonmäärittäminen ei ole mukana tutkimuksessa.

1.4 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tutkimukseen kuuluu sekä kirjallisuustutkimus että soveltava tutkimus. Kirjallisuustutkimuksessa perehdytään maalaserkeilaukseen ja metsän arvonmäärittämiseen sekä aikaisempiin tutkimuksiin erityisesti vertaisarvioitujen artikkeleiden perusteella. Metsän arvioinnista tietoa löytyy myös alan yleisteoksista. Soveltavassa osassa laserkeilausaineistosta valitaan mittausaineisto, joka on tutkittavista puista, Bentley'n MicroStation-ohjelmistolla. Tilavuuden määrittäminen on selitetty tarkemmin alaluvussa 4.3.

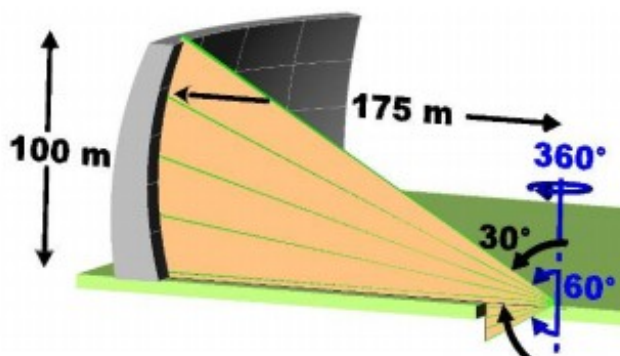
Tutkimuksessa hyödynnetään mittausaineistoa, joka oli saatu laserkeilaamalla yksi koivu ja mänty viiteen eri paikkaan sijoitetulla maalaserkeilaimella tuulisella ja tuulettomalla säällä. Puuston arvomäärittäminen tehtiin kuvitteelliselle kiinteistölle, jolla on vain mitatun kaltaisia koivuja ja mäntyjä (tarkemmin luvussa 4.1). Puuston arvo selvitetään sekä tuottoarvo- että summa-arvomenetelmällä, jotta voidaan tarkastella myös arviointimenetelmän vaikutusta.

2 Metsän maalaserkeilaus

Tämä luku käsittelee metsien maalaserkeilausta yleisellä tasolla. Alaluvuissa tarkastellaan maalaserkeilauksen toimintaperiaatetta ja soveltamiskohteita metsien kartoituksessa sekä yksittäisen puun tilavuuden määrittämistä keilausaineistosta. Lisäksi alaluvussa 2.4 kerrotaan tuulen vaikutuksesta maalaserkeilauksen tuloksiin.

2.1 Maalaserkeilauksen toimintaperiaate

Laserkeilauksessa tavoitteena on selvittää kohteen kolmiulotteinen muoto lähettämällä lyhyitä laservalopulsseja eri avaruuskulmiin. Kuvassa 1 on havainnollistettu tyypillisen maalaserkeilauslaitteen toimintaperiaate. Lähetetyn ja kohteesta heijastuneen valon perusteella määritetään heijastuksen aiheuttaneiden pisteiden paikka ja siten kohteen kolmiulotteinen muoto.



Kuva 1. Maalaserkeilauksen toimintaperiaate ja kupolimaisen mittauskuvion havainnollistus (Van Genechten, 2008, s. 184).

Laserkeilauksessa käytetään laservaloa joko lyhyinä pulsseina tai jatkuvana valona (Van Genechten 2008). Mittauksen kestoon vaikuttaa eniten käytettävän laitteen ominaisuudet ja mittausympäristö (Béland ym., 2011; Calders ym., 2017; Cifuentes ym., 2014; Jaboydeoff ym., 2012; Liang ym., 2016). Pääsääntöisesti mitä tarkempia tuloksia halutaan, sitä pidempi on mittausaika. Aallonpituus vaikuttaa paikkaresoluutioon ja sen määrittämiseen. Joissain menetelmissä käytetään kahta aallonpituudeltaan erilaista valoa.

Yleensä laservalon lähtin, valon havaitsin eli vastaanotin ja pisteen etäisyyden laskenta on integroitu keilaimeksi (Béland ym., 2011; Calders ym., 2017; Cifuentes ym., 2014; Jaboydeoff ym., 2012; Liang ym., 2016; Van Genechten, 2008). Maalaserkeilauksessa keilain on tukevasti maahan kiinnitetyllä jalustalla mittauksen ajan. Joskus keilausmittaukset tehdään sijoittamalla keilain eri suuntiin verrattuna kohteeseen ja yhdistämällä rekisteröinniksi kutsutulla menetelmällä eri suunnista saadut mittaustulokset kolmiulotteiseksi kohdemalliksi.

Käytännössä maalaserkeilausmittausjärjestelmään tarvitaan keilaimen ja sen jalustan lisäksi erillinen teholähde (verkkovirta tai akku) ja pakkokeskistysalusta (Van Genechten, 2008). Jalustana käytetään yleensä kolmijalkaa, jonka yläosaan kiinnitetään pakkokeskistysalusta, johon varsinainen mittauslaite asennetaan. Pakkokeskistysalustan ja jalustan tehtävänä on pitää mittauslaite mahdollisimman tukevasti paikallaan mittauksen aikana. Keilaimen lähtinosa lähettää lasersäteen, ja ilmaisinsa analysoi esteestä hei-

jastunutta ja ilmaisimeen osunutta lasersädettä. 3D-mallin muodostamiseksi mittauksissa voidaan käyttää myös tähyspalloja, mikä on erityisen tärkeää, jos ympäristössä on liikkuvia kohteita (vrt. kuva 13).

Maalaserkeilaimen keskeisiä teknisiä ominaisuuksia ovat kulmaresoluutio, keilauskulma, mittausetäisyys ja lasersäteen divergenssi (säteen hajoamiskulma) (Jaboydeoff ym., 2012). Kulmaresoluutio on eri suuntiin lähetettävien kahden säteen väliin jäävä pienin kulma. Keilauskulma on laitteen horisontaalinen näkymä eli tasokulma, jonka säteet muodostavat (vrt. kuva 1). Näistä kulmaresoluutio vaikuttaa siihen, kuinka yksityiskohdaisesti kuvauskohde mitataan. Kun keilauskulman jako on hienompi, pistetiheys kasvaa ja yksityiskohdat erottuvat paremmin. Keilauskulman jako vaikuttaa merkittävästi myös mittausprosessin kestoon. Jos laitteessa on rajoitettu näkymää tai ympäristön esteet lyhentävät havaintoetäisyyttä, aikaa kuluu keilaimen kääntelyyn ja siirtelyyn paikasta toiseen.

2.1.1 Mittauskuviot

Keilausmittauksessa määritetään epäsäännöllisesti sijaitsevien lasersäteiden heijastusta aiheuttavien pisteiden paikat (koordinaatit) kolmiulotteisessa avaruudessa (Van Genechten, 2008). Yleensä mitattujen pisteiden tiheys on sitä suurempi, mitä lähempänä ollaan keilainta. Joissakin maalaserkeilauslaitteissa pistetiheyttä voidaan säädellä tarvittaessa. Keilain mittaa sekunnissa jopa satoja tuhansia pisteitä.

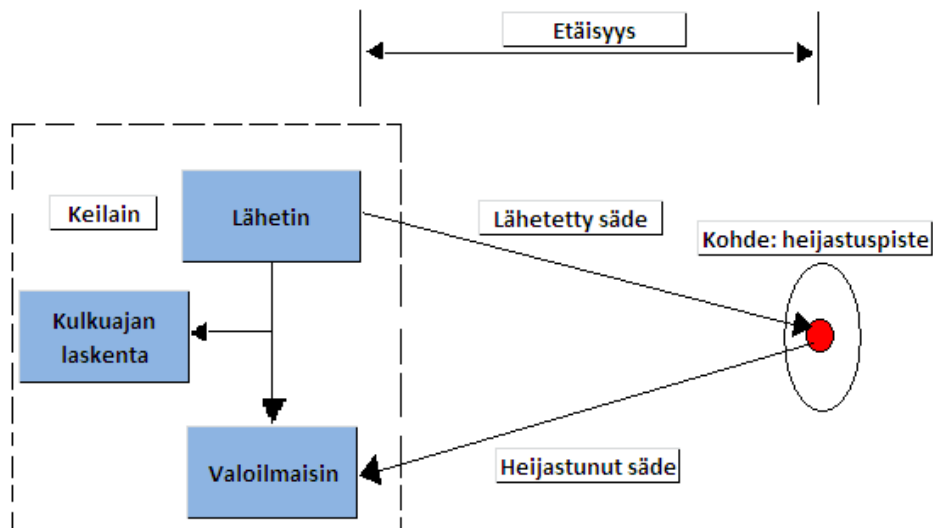
Mittausnopeuteen vaikuttaa eniten laitteiston mittauskuvio. Kuviot ovat joko kupolimaisia, keilamaisia tai panoraamaisia (Jaboydeoff ym., 2012). Lisäksi on olemassa optiseen kolmiomittaukseen perustuvia maalaserkeilaimia (Van Genechten, 2008). Yleensä käytetään kupolimaisia mittauskuvioita, jossa mittaamatta jää ainoastaan pieni alue keilaimen alapuolella. Kuvassa 1 on esitetty kupolimainen mittauskuvio ja mittaamatta jäävä kartiomainen tilavuus pystyakselilla. Jos mittauskuvion vertikaalinen keilauskulma olisi 30 astetta, 30 m korkeat kohteet voitaisiin mitata vähintään noin 52 m:n päässä.

2.1.2 Etäisyyden määrittäminen

Keilaimen ja mitattavan kohteen välinen etäisyys määritetään ilmaisinosalla. Etäisyys voidaan laskea kolmella eri tavalla: lähtevän ja tulevan lasersäteiden vaihe-eron, valon kulkuajan tai vaihe-eron ja valon kulkuajan yhdistelmän perusteella.

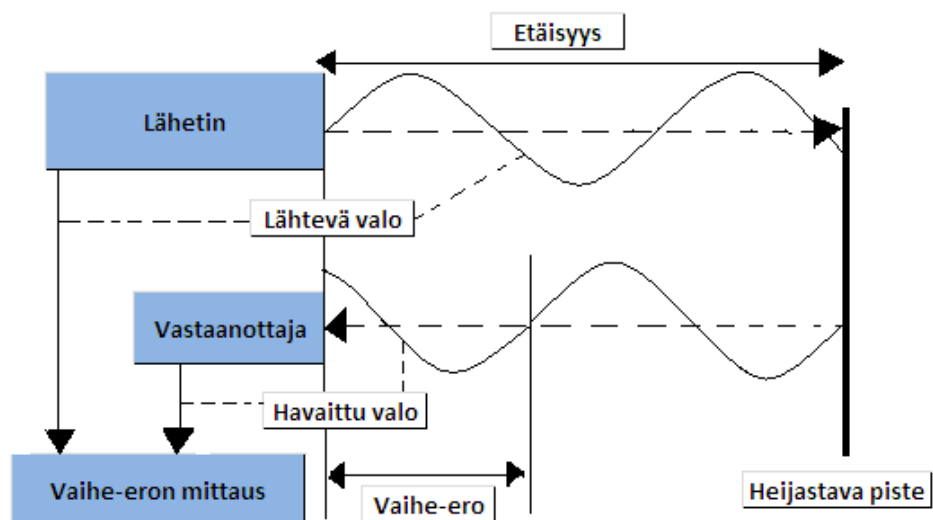
Pulssilaserin toiminta perustuu kohteesta takaisin heijastuvan lasersäteiden edestakaisen kulkuajan mittaamiseen (Van Genechten, 2008). Pulssilaserin toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 2. Lähetetyn lasersäteiden lähetysajan ja valoilmaisimeen heijastuneen laservalon tuloajan perusteella lasketaan edestakainen kulku-aika. Käytännössä lähetin ja valon vastaanotin ovat lähekkäin, jolloin mittauslaitteen ja kohteen välinen etäisyys lasketaan kertomalla valonnopeus säteen edestakaisella kulkuajalla ja jakamalla kahdella. Pulssilaserin mittausetäisyys vaihtelee sadoista metreistä muutamiin kilometreihin. Tällainen keilain on esimerkiksi RIEGL VZ-400 (Calders ym., 2017).

Käytännössä pulssilaserin suurimpaan mahdolliseen mittausetäisyyteen vaikuttaa eniten puiden mahdollinen liike mittausten aikana ja pulssin lähetysteho (Van Genechten, 2008). Havaintoja saadaan sekunnissa keskimäärin muutama tuhat, jolloin esimerkiksi tuulen aiheuttaman liikkeen seurauksena lasersäde joko osuu ensin mittauslinjalle kallistuneeseen puuhun tai menee ohi seuraavaan kohteeseen. Suuntakohtaisen mittausajan pidentäminen parantaa tuloksia ja hidastaa mittaamista, koska keilain mittaa vain yhtä valopulssia kerrallaan.



Kuva 2. Pulssilaserin toimintaperiaate.

Vaihe-erolaserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. Keilain lähettää valopulssin, joka heijastuu mittaushetkellä takaisin. Mittauslaite mittaa valon kulkuajan sijaan lähtevän ja tulevan signaalin vaihe-eron (Van Genechten, 2008). Keilaimen laser lähettää jatkuvaa signaalia, jota voidaan moduloida esimerkiksi siniaalloksi. Tarvittaessa voidaan käyttää useampaa sensoria tai pidempää aallonpituutta (toista modulaatiota) oikean kokonaisen valoallon löytämiseksi. Laite mittaa vaihe-eron lähetetyn ja kohteesta takaisin heijastuneen signaalin välillä. Toistotaajuus voi olla peräti 500 kHz, mikä on huomattavasti parempi kuin pulssilaserilla. Mittausetäisyyden vaikuttaa kantoaallon modulaatio ja lähetysteho. Suurin mittausetäisyys on yleensä alle 100 m.



Kuva 3. Vaihe-erolaserin toimintaperiaate.

2.1.3 Mittausaineistojen rekisteröinti

Maalaserkeilaimella mitattujen aineistojen jatkokäsittely edellyttää niiden rekisteröintiä laitevalmistajan ohjelmistolla (Reshetyuk, 2009). Keilatusta kohteesta eri suunnista mi-

tatut aineistot yhdistetään suhteessa toisiinsa ja kohteeseen. Käytännössä ratkaistaan kahden tai useamman mittausaineiston välinen koordinaatistomuunnos, jonka avulla mittausaineistot saadaan muunnettua samaan koordinaattijärjestelmään.

Yhdistämismenetelmiä on useita, mutta eniten käytetään pintojen yhteensovitusta ICP-menetelmällä (Iterative Closest Point) (Reshetyuk, 2009). Menetelmä perustuu laajasti sovellettuun minimointiongelman numeeriseen ratkaisuun ja siinä etsitään iteratiivisesti mahdollisimman pientä sijainnillista eroa kahden likimääräisesti kohdistetun kolmiulotteisen pinnan välillä. Aluksi valitaan yhdeltä pinnalta pisteitä, joiden sijaintia verrataan toisen pinnan oletettujen vastinpisteiden sijaintiin. Edellisen pinnan pisteet on kohdistettu likimääräisesti lähelle toisiaan. Valintojen jälkeen lasketaan vastinpisteiden etäisyyksien neliösumma. Pintojen keskinäistä sijaintia muutetaan vähän, lasketaan uudet etäisyydet ja verrataan aikaisempiin neliösummiin. Iteroimalla pyritään löytämään vastinpisteiden etäisyyksien pienin mahdollinen neliösumma. Iterointikierroksia lisättäessä pinnoilla olevien pisteiden sijainti vastaa paremmin toisiaan.

Toinen yhdistämismenetelmä on LS3D-menetelmä (Least Squares 3D Surface Matching) (Reshetyuk, 2009). Menetelmässä pistepilvien keskinäinen kohdistaminen tapahtuu aitojen 3D-pistepilvien yhteensovituksena pintojen yhteensovituksen sijaan. Minimointitehtävän ratkaisussa sovelletaan samaa menetelmää kuin edellä mainitussa ICP-menetelmässä. Kolmas vaihtoehto on pienimmän neliösumman ratkaisuun perustuva rekisteröintimenetelmä (least-squares registration method), jossa ratkaistaan sekä koordinaatistomuunnos että vastinpisteiden sijainti samanaikaisesti (Van Genechten, 2008).

2.2 Soveltamiskohteet metsien kartoituksessa

Maalaserkeilauksen tärkein soveltamiskohde metsien kartoituksessa on metsän inventointi, jossa selvitetään esimerkiksi puiden biomassa, puiden runkojen kokonaistilavuus tai energiapuun määrä (Liang ym., 2016). Tällä mittausmenetelmällä metsän inventointi onnistuu automaattisesti, nopeasti ja tarkasti. Yksityiskohtaisista metsävaratiedoista niiden hyödyntäjiä kiinnostavat eniten puun korkeus ja laji sekä halkaisija ihmisen rinnan korkeudella (n. 1,3 m). Näitä tietoja tarvitaan mm. laadittaessa metsäsuunnitelmaa, tarkkailtaessa metsän hyvinvointia pidemmällä aikavälillä ja analysoitaessa tarkemmin puuston korjuupotentiaalia.

Metsien maalaserkeilaus voidaan tehdä yhdestä tai useammasta paikasta (Liang ym., 2016). Yhden keilauksen menetelmässä keilain laitetaan keskelle keilattavaa aluetta, jolloin keilauksen tuloksena on yksi panoraamakuvan kaltainen näkymä mitattuja pisteitä (Wei ym., 2016). Puusto lasketaan tämän yhden pistepilven perusteella.

Useammasta paikasta tehtävässä keilauksessa suurin merkitys on keilainten lukumäärällä. Jos käytössä on vain yksi keilain, mittauslaitetta joudutaan siirtämään jokaisen mittauksen jälkeen uuteen paikkaan. Kun keilaimia on enemmän, kohdealuetta voidaan mitata samanaikaisesti useammasta kohdasta sekä alueen sisältä että sen ulkopuolelta. Tarkoituksena on kerätä enemmän tietoa metsäalueesta kasvattamalla mittauspisteiden määrää, jolloin saadaan myös tarkempia tuloksia (Olofsson & Holmgren, 2016). Keilauksissa käytetään esimerkiksi puihin kiinnitettäviä pallon muotoisia tähyksiä, joiden avulla mittausaineistot rekisteröidään yhteen useammasta paikasta. Aikaa kuluu kuitenkin selvästi enemmän kuin yhden keilauksen menetelmällä mitattaessa, mutta tulos on huomattavasti yksityiskohtaisempi ja kattavampi kuin yhden keilauksen menetelmällä.

Keilausaineiston hyödyntäminen metsän metsävaratietojen laskennassa ja arvioinnissa edellyttää puiden kolmiulotteista mallintamista (Liang ym., 2016). Vaihtoehtoja mallintamiseen on kaksi: yksittäisten puiden tai tietyllä alueella olevien puiden mallintamiseen perustuva menetelmä (Lin & Herold, 2016). Kun mallinnetaan yksi puu kerrallaan, laserkeilauksen pistepilvi kattaa mahdollisimman hyvin vain mallinnettavan yksittäisen puun. Yleensä puu on keilattu eri suunnista, ja mittausaineistot on yhdistetty puuhun kiinnitettyjen tähyspallojen avulla. Varsinainen mallinnus aloitetaan tyypillisesti puun alaosasta, josta edetään kohti latvaa. Tämän menetelmän käyttäminen on järkevää, kun tarkoituksena on mallintaa esimerkiksi maantien varrella sijaitsevia yksittäisiä puita tai isolla alueella olevia harvoja yksittäisiä puita eikä siten sovellu varsinaiseen metsän arviointiin.

Toisessa mallinnusvaihtoehdossa pyritään havaitsemaan mittausalueen tietystä osasta kaikki yksittäiset puut kerralla (Liang ym., 2016). Puiden havaitseminen voidaan tehdä kolmella eri tavalla. Kaksiulotteisen tason hakumenetelmässä puiden rungot tunnustetaan pisteitä ryhmittelemällä, analysoimalla pinnan muotoja tai määrittelemällä ympyränmuotoinen kehä (Olagoke ym., 2016). Tunnistuksessa pohja-aineistona käytetään osaa pistepilvestä tietyltä korkeudelta, mikä vaatii myös maanpintamallin (Kong ym., 2016). Hyvään tulokseen päästään, kun tunnistusprosessia toistetaan useita kertoja.

Kuvapohjaisessa ryhmittelymenetelmässä kohteiden väliseen etäisyyteen perustuvat kuvapistet ryhmitellään esimerkiksi pinnan kaarevuuden tai etäisyyden perusteella (Liang ym., 2016). Menetelmän numeerinen laskenta tapahtuu nopeasti, sillä kolmiulotteinen naapuripisteiden hakumenetelmä voidaan muuttaa kaksiulotteiseksi. Muunnos kuitenkin vaikeutuu, jos yksittäisiä keilausaineistoja ei voida erottaa toisistaan.

Mallinnuksessa voidaan soveltaa myös pistepilven käsittelymenetelmiä, joissa pisteiden ominaisuudet tutkitaan (Liang ym., 2016). Esimerkiksi Faron SCENE-ohjelmisto tunnistaa puun rungon automaattisesti (Seidel ym., 2016). Menetelmä sopii erilaisille pistepilviaineistoille, mutta laskentaa tarvitaan olennaisesti enemmän kuin muissa menetelmissä.

Mittausaineistosta voidaan tehdä joko kolmiulotteisia malleja puista tai kaksiulotteinen aluekartta (Liang ym., 2016). Eri menetelmissä on kuitenkin erilaiset tiedonkeruutavat ja tarkkuudet. Puita keilattaessa havaitaan lisäksi mahdollisesti myös mittauslinjalla olevia kohteita, jolloin puun rakennetta ei saa mitattua täydellisesti (Shettels ym., 2016). Lisäksi aluepohjaisessa mallinnusmenetelmässä on ratkaistava, miten käsitellään alueet, joissa pistetiheys on alhainen.

Maalaserkeilaukseen perustuvilla uusilla metsän inventointimenetelmille on kehitystyössä tunnistettu kolme keskeistä vaatimusta: tiedonkeruun ja tiedon tulkinnan ei pitäisi olla kallista, menetelmällä saatavan tiedon pitäisi tuottaa metsään liittyvän päätöksenteon kannalta olennaista tietoa erilaisilla asetuksilla (mittakaava, aikaväli jne.) ja uuden menetelmän pitäisi olla vähintään vanhan menetelmän tasolla tai tuoda huomattavasti enemmän lisäarvoa metsävaratiedonkeruuseen (Liang ym., 2016). Kaikkia vaatimuksia on vaikea saavuttaa samanaikaisesti. Jos tavoitteena ovat tarkat metsävaratiedot, kustannukset todennäköisesti nousevat, koska tällaiset tulokset edellyttävät luotettavia lähtötietoja. Valittaessa otetaan menetelmä, joka sopii tilanteeseen parhaiten.

Metsien maalaserkeilauksen toinen yleinen soveltamiskohde on metsäekologia. Mittausaineiston avulla voidaan esimerkiksi laskea metsän lehtialaindeksi (Zheng ym., 2013), puun lehtipinta-alan jakauma (Béland ym., 2011), säteilyn määrä puun reunoilla

(Van Leeuwen ym., 2013) ja jakauma (Cifuentes ym., 2014) sekä mallintaa puun latvan rakenne (Bayer ym., 2013). Lisäksi selvitetään osittain samoja puiden ominaisuustietoja kuin metsien inventoinnissa (Liang ym., 2016).

2.3 Puun rungon tilavuuden määrittäminen

Puun tilavuuden määrittäminen maalaserkeilauksella sisältää kolme vaihetta: mittaukset, mitausaineiston käsittely ja varsinainen tilavuuden laskenta (Saarinen, 2017). Mittausten aluksi päätetään keilainten sijoituspaikat. Yksittäisen keilaimen sijainnin valintaan vaikuttavat tavoitellun tarkkuustason lisäksi muun muassa mitausalueen koko ja muoto, maanpinnan ominaisuudet, puiden tiheys metsässä, sää mitausajankohtana sekä käytettävien tähyksien määrä ja sijoitusmahdollisuudet kohdealueella (Bu & Wang, 2016). Pienellä alueella riittää muutama keilaus. Suurella alueella keilauksia tarvitaan useita, jos tavoitteena on ensisijaisesti mahdollisimman tarkka mitaus metsästä (Forsman ym., 2016). Tällaisessa tapauksessa keilaus vaatii aikaa, koska mitattavia pisteitä on todennäköisesti vähintään miljoonia.

Tähyksiä joudutaan sijoittamaan runsaasti mitausalueelle, jos useilla mitauslaitteilla mitataan yhtä aikaa (Jones ym., 2016). Sijoittamiseen vaikuttavat myös alueen muoto, puiden tiheys ja aluskasvillisuus maan pinnalla. Yleensä tähykset ovat pallonmuotoisia, mutta tähyksiä voivat olla myös mm. tasot sekä tähystaulut tai -kulmat.

Suunnitteluvaiheessa on vielä vaikea arvioida sään, puiden tiheyden ja maanpinnan ominaisuuksien lopullista vaikutusta mittaukseen, vaikka kohdealueella olisi käyty etukäteen ennen mittauksia (Saarinen, 2017). Hyvä ennakkovalmistautuminen auttaa kuitenkin hahmottamaan todennäköisyydet erilaisille ongelmatilanteille. Esimerkiksi säähän ei voida vaikuttaa, mutta mitausajankohtaa voidaan muuttaa sääennusteen perusteella (Kalders ym., 2016). Maanpinnan ominaisuuksien ja puiden tiheyden tarkemmat yksityiskohtaiset vaikutukset mitaussuunnitelmaan selviävät metsässä tehtävällä katselmuksella. Mikäli tarkoituksena on mitata puita tietyltä etäisyydeltä, puiden keskinäiseen sijaintiin ja maanpinnan muotoon on syytä kiinnittää enemmän huomiota (Kankare ym., 2016). Tärkeintä on, että jokaisesta suunnitellusta mitauspisteestä on hyvä näkyvyys mitattaviin puihin.

Mittausaineiston käsittelyvaiheeseen kuuluu pistepilvien suodatus ja aineistojen yhdistäminen (Saarinen, 2017). Suodatusta varten aineistot ladataan laitevalmistajan ohjelmistoon, jossa pistepilvestä poistetaan kohinaa ja muita häiriöitä sekä sellaiset pisteet, joita ei ole mitattu puista. Pisteiden poistamisesta on useimmiten hyötyä, koska se pienentää käsiteltävien pistetiedostojen kokoa, mikä nopeuttaa koko prosessia. Jos pisteitä pitää poistaa vain muutamia, suodatusta ei kannata tehdä, mikäli kyseessä ei ole erityistä tarkkuutta vaativa työ (You ym., 2016). Pisteiden suodattamiseen on olemassa erilaisia menetelmiä. Esimerkiksi mitausetäisyyteen perustuvassa suodatuksessa muodostetaan kolmiulotteisessa ympäristössä säde pallolle, jonka keskipisteessä on mitauslaite (Olschofsky ym., 2016). Suodatuksen jälkeen algoritmit tunnistavat automaattisesti tähykset mitausaineistosta tähyksen muodon ja intensiteetti-arvojen perusteella. Lopuksi algoritmit yhdistävät mitausaineistot.

Puun tilavuus voidaan laskea joko automaattisesti tai manuaalisesti (Saarinen, 2017). Automaattisessa laskentatavassa käytetään sopivaa algoritmia, joka laskee rungon halkaisijan tarkasti esimerkiksi ympyrän sovituksella 1 cm:n välein alkaen kohdasta, josta metsäkone todennäköisesti sahaa puun irti maasta (Xi ym., 2016). Ympyröiden sovittaminen päättyy, kun halkaisija on niin pieni, ettei puu kelpaa enää myytäväksi. Varsinai-

nen koko puun tilavuus voidaan laskea muun muassa kahden peräkkäisen sovitetun ympyrän välille muodostuneiden lieriöiden tai katkaistujen kartioiden tilavuuksien summana (Sun ym., 2016). Manuaalisessa laskentatavassa toimintaperiaate on muuten sama, mutta rungon halkaisija mitataan pistepilvestä ilman ympyrän sovitusta ja kokonaistilavuus määritetään erikseen (Yan ym., 2016). Tällöin on tärkeää ottaa huomioon rungon muoto poikkileikkauksen eri korkeuksilla.

Puun tilavuuden laskentatavan valintaan vaikuttaa erityisesti etukäteen määritetty mallinnuksen tarkkuustaso. Jos tarkoituksena on tarkastella vain puun pituutta ja paksuutta, laskentaprosessi on yksinkertainen. Mikäli halutaan selvittää puun tilavuus mahdollisimman tarkasti, joudutaan käyttämään monimutkaisempia laskentamenetelmiä (Forsman ym., 2016; Olschofsky ym., 2016; Sun ym., 2016; Xi ym., 2016; You ym., 2016). Erilaisten tarkkuustasojen mukaisia puun 3D-malleja on esitetty kuvassa 4 asteikolla 1–5. Tasoja kuvaavat puut näkyvät kuvassa järjestyksessä vasemmalta oikealle siten, että kuvassa äärivasemmalla oleva 3D-malli edustaa tarkkuustasoa 1.

Yksinkertaisin tason 1 mukainen 3D-malli perustuu puun korkeuteen ja halkaisijaan ihmisen rinnan korkeudella (Liang ym., 2016). Tasoa 2 vastaava 3D-malli näyttää myös rungon muodon ja puun asennon maastossa. Kun 3D-mallissa näkyy rungosta lähtevät oksat, kyseessä on tason 3 mukainen 3D-malli. Vielä tarkemmassa tasoa 4 vastaavassa 3D-mallissa on mallinnettu jo pieniä oksia ja puun alaosaa ympäröivää kasvustoa. Tasoon 5 tarkkuusvaatimukset täyttävä 3D-malli on lähes täydellinen numeerinen esitys todellisesta puusta metsässä ympäröivä kasvusto mukaan lukien. Käytännössä tason 5 tarkkuusvaatimukset täyttävää 3D-mallia ei ole mahdollista tehdä maalaserkeilausaineistosta, koska maalaserkeilauksella ei vielä kyetä määrittämään esimerkiksi puiden lehtiä tarkasti.



Kuva 4. Maalaserkeilatun puun 3D-mallinnuksen viisi erilaista tarkkuustasoa (Liang ym., 2016, s. 68).

2.4 Tuulen vaikutus

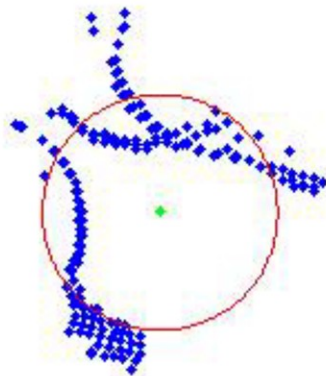
Sää ei ole aina optimaalinen maalaserkeilauksen suorittamiseen. Samankin päivän aikana sää voi vaihdella voimakkaasti. Mittauslaitteet voivat kastua tai jopa kaatua.

Tuuli vaikeuttaa puiden laserkeilausmittauksia. Puut ja niiden osat liikkuvat tuulessa. Lisäksi lasersäde ei välttämättä koko ajan heijastu samasta kohteesta, vaan välillä esimerkiksi puun lehdestä, joka on siirtynyt lasersäteen kulkureitille tuulen seurauksena. Kevytkin tuuli saattaa heiluttaa korkeita puita.

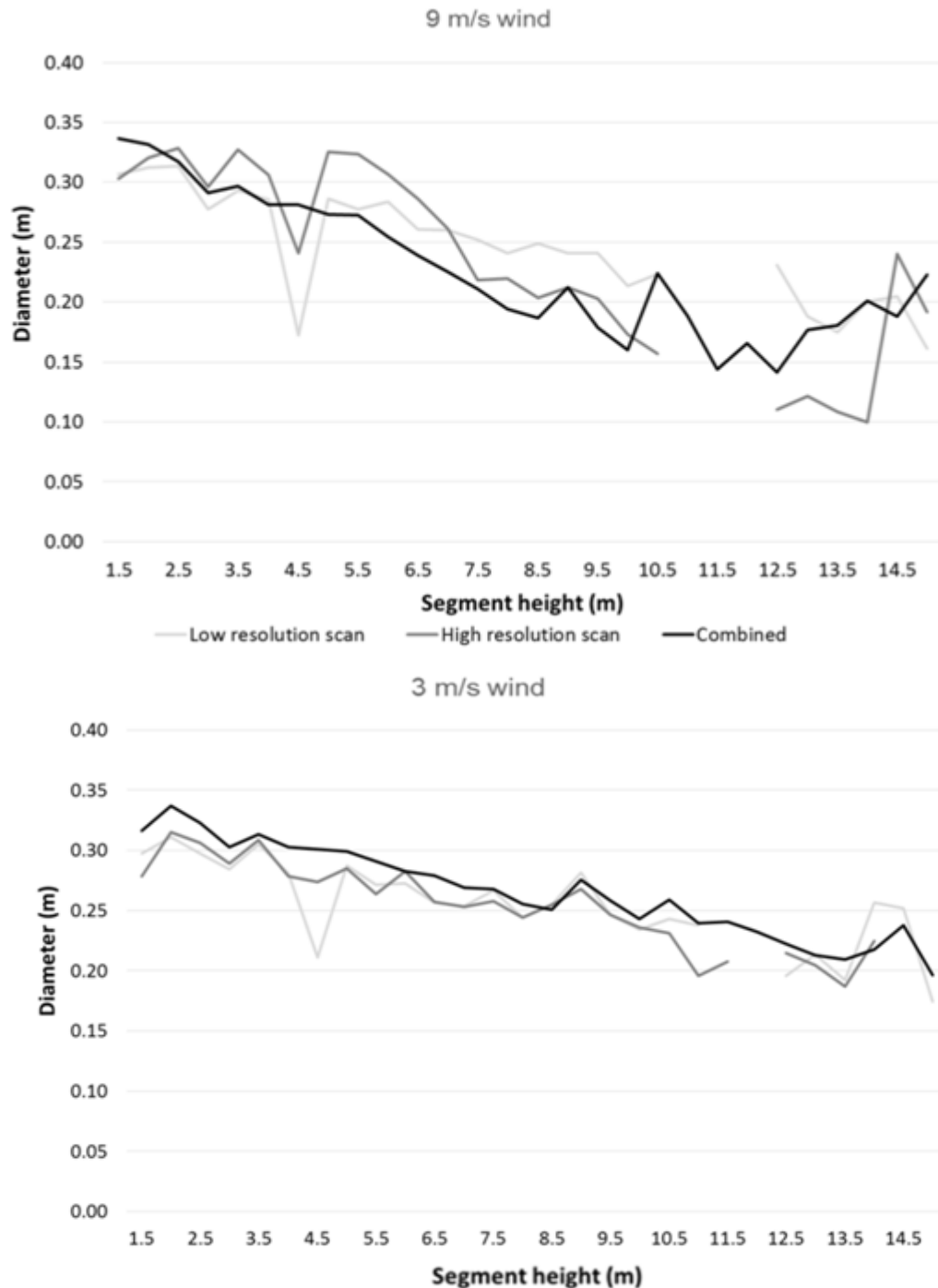
Pääsääntöisesti tuuli ei kuitenkaan estä mittauksia metsässä. Tuuli aiheuttaa vaihtelevia ja tilapäisiä muutoksia puussa keilauksen aikana (Vaaja ym., 2016). Tuulen vaikutus pitäisi kuitenkin tietää kvantitatiivisesti eri olosuhteissa. Lisäksi voitaisiin selvittää tuulen vaikutuksen minimointimahdollisuuksia.

Toistaiseksi tuulen vaikutusta puiden maalaserkeilaukseen on tutkittu vähän. Asiaan ovat perehtyneet esimerkiksi Vaaja ym. (2016) omassa tutkimuksessaan. Kahtena mittauspäivänä mäntyjä keilattiin Espoon Otaniemessä elo-syyskuun vaihteessa 2016, jolloin tuulen keskinopeudet olivat ensimmäisenä päivänä 3 m/s ja toisena päivänä 9 m/s. Molempina mittausajankohtina mäntyjä keilattiin kolmella eri tavalla: yhdestä paikasta sekä pienellä että korkealla resoluutiolla ja kolmesta eri paikasta matalalla resoluutiolla. Jälkimmäisessä mittauksessa puun halkaisija määritettiin yhdestä pistepilvestä mittaustulosten rekisteröinnin jälkeen. Mittauksia varten yksi mänty jaettiin osiin 1,5 m:n korkeudesta 17 m:n korkeuteen puolen metrin välein. Jokaiselle osalle määritettiin mm. rungon keskipiste ja halkaisija mittaustulosten sovitettuna ympyrän avulla.

Kuvassa 5 on esitetty, miten tuuli vaikeuttaa ympyrän sovittamista pistepilveen (Vaaja ym., 2016). Runkoa vastaavien heijastusten muodostavan pistepilven rakenne hajoaa puun heilun seurauksena. Tuuli vaikutti myös sovitettuna ympyrän perusteella lasketun männyn halkaisijaan. Kuvassa 6 on esitetty korkealla ja matalalla resoluutiolla mitatuista aineistoista sovitettuna ympyrän avulla lasketut halkaisijat. Lisäksi kuvassa 6 tummin käyrä sisältää aineiston, jossa kolme mittausasemaa on rekisteröity yhteen. Voimakkaalla tuulella tehtyjen mittausten perusteella männyn halkaisijan laskeminen on odotetusti vaikeaa erityisesti latvan korkeudella ja eri mittaustulokset poikkeavat merkittävästi toisistaan. Parempi resoluutio tuulisella säällä ei välttämättä paranna laserkeilauksen tulosta.



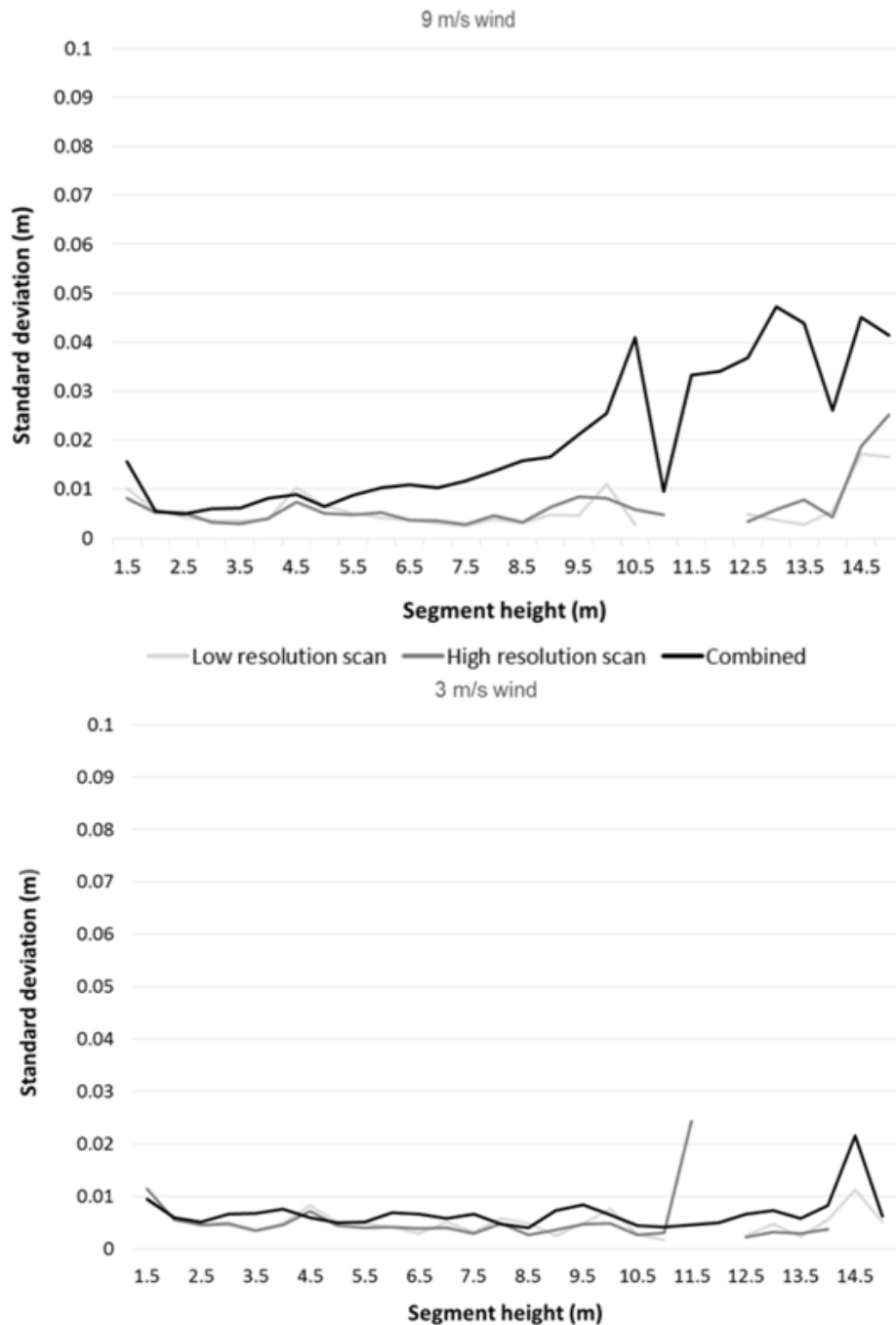
Kuva 5. Tuulen vaikutus männyn rungon maalaserkeilaukseen (Vaaja ym., 2016, s. 119). Kuvassa näkyy tarkalla resoluutiolla kolmesta eri suunnasta keilatun männyn pistepilven sovitettu ympyrä, kun keskituuli oli 9 m/s. Voimakas tuuli hajotti pistepilven.



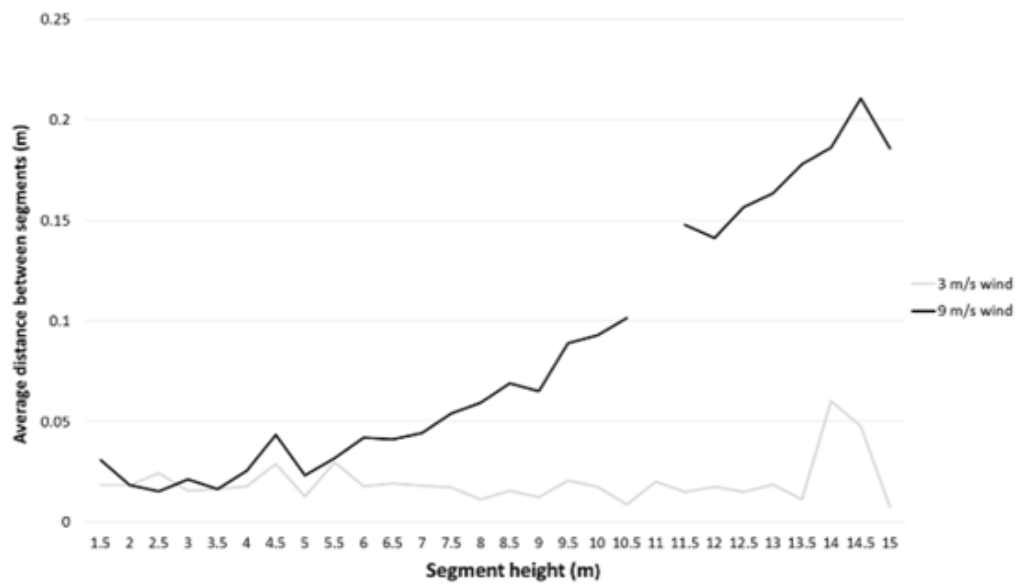
Kuva 6. Mittausaineistoon sovitetusta ympyrästä laskettu männyn halkaisija eri korkeuksilla ja mittausasetelmissä, kun keskituuli oli 3 (alempi) ja 9 m/s (ylempi). Kuvassa vaalein käyrä perustuu matalalla resoluutiolla ja toiseksi vaalein käyrä korkealla resoluutiolla mitattuun aineistoon. Tummin käyrä perustuu aineistoon, jossa kolme eri mittausasemaa on rekisteröity yhteen (Vaaja ym., 2016, s. 120).

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty männyn rungosta mitattujen pisteiden etäisyyksien keskiarjonta ja sovitetun ympyrän keskipisteen keskimääräinen etäisyys kolmen eri mittauksen välillä eri korkeuksilla, kun keskituuli oli 3 ja 9 m/s (Vaaja ym., 2016). Tuuli heikensi molempien suureiden mittaustarkkuutta, joka oli huonoin männyn latvassa, jossa rungon sovitetun ympyrän keskipiste poikkesi 9 m/s -tuulella yli 20 cm kolmen eriaikais-

ten ja eri suunnista tehtyjen mittausten välillä. Mittausmenetelmistä heikoimmat tulokset saatiin kolmen keilauksen menetelmällä.



Kuva 7. Männyn rungosta mitattujen pisteiden etäisyyksien keskihajonta sovitetun ympyrän keskipisteestä, kun keskituuli oli 3 (alempi) ja 9 m/s (ylempi). Kuvassa vaalein käyrä perustuu matalalla resoluutiolla ja toiseksi vaalein käyrä korkealla resoluutiolla mitattuun aineistoon. Tummin käyrä perustuu aineistoon, jossa kolme eri mittausasemaa on rekisteröity yhteen (Vaaja ym., 2016, s. 120).



Kuva 8 Männyn runkoon sovitettujen ympyröiden keskipisteiden keskimääräinen etäisyys toisistaan kolmen eri mittauksen välillä ja eri korkeuksilla, kun keskituuli oli 3 ja 9 m/s (Vaaja ym., 2016, s. 120).

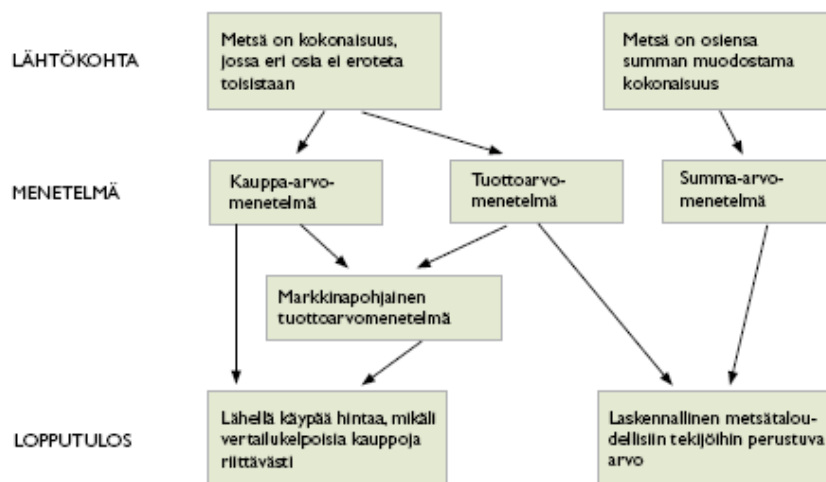
3 Metsänarviointi

Tässä luvussa tarkastellaan metsän inventointia erityisesti puuston arvioinnin näkökulmasta. Alaluvuissa tarkastellaan metsien arvioinnissa käytettäviä arviointimenetelmiä ja puuston tilavuuden määrittämistä relaskoopin avulla.

3.1 Arviointimenetelmät

Suomessa metsän arvioinnissa on käytössä pääsääntöisesti kolme arviointimenetelmää: summa-arvo-, tuottoarvo- ja kauppaa-arvomenetelmä (Paananen ym., 2009). Muita menetelmiä kuten kustannusarvo- tai hakkuumahtomenetelmiä käytetään harvemmin. Perinteisesti arviointimenetelmäksi on valittu tuottoarvomenetelmää soveltava summa-arvomenetelmä, mutta alan tutkimuksissa on havaittu, ettei se kaikissa tilanteissa ole paras valinta (Airaksinen ym., 2009). Tarvetta uusille menetelmille ovat lisänneet mm. yleisesti kasvanut kiinnostus metsävarojen hyödyntämisestä kohtaan ja negatiiviset kokemukset summa-arvomenetelmän käytöstä.

Metsän arviointimenetelmiä ja sovellettavan menetelmän valintaprosessia on havainnollistettu kuvassa 9. Menetelmää ei voi valita esimerkiksi arpomalla, vaan valinnan tulisi perustua arviointikohteen huolelliseen analyysiin (Airaksinen ym., 2011). Mahdollisesti joudutaan käyttämään useampia menetelmiä, joiden antamia tuloksia verrataan keskenään. Tällainen on mm. markkinapohjainen tuottoarvomenetelmä, jossa sovelletaan sekä tuottoarvo- että kauppaa-arvomenetelmää. Mikään arviointimenetelmä ei kuitenkaan anna yhtä ainoaa oikeaa vastausta, vaan kyseessä on aina arvioijan subjektiivinen näkemys kohteen arvosta.

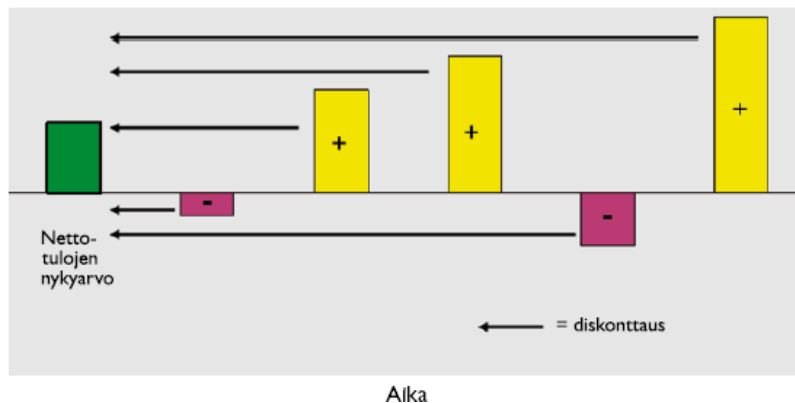


Kuva 9. Metsän arviointimenetelmän valinta (Airaksinen ym., 2011, s. 12).

Käytännössä arviointikohteet jaetaan kahteen osaan: kokonaisiin metsätiloihin ja pieniin erillisiin metsää kasvaviin alueisiin (Airaksinen ym., 2011). Kokonaisia metsätiloja myydään säännöllisesti, jolloin markkinapohjainen arvo määritetään tuottoarvomenetelmällä tai edustavien kauppia perusteella kauppaa-arvomenetelmällä. Sen sijaan pieniä metsäalueita myydään niin harvoin, ettei arvonmääritys ole mahdollista kauppaa-arvomenetelmällä. Näissä tilanteissa luotettavin vaihtoehto on tuottoarvopohjainen menetelmä.

3.1.1 Tuottoarvomenetelmä

Tuottoarvomenetelmässä metsän arvo lasketaan metsästä tulevaisuudessa saatavien tuottojen perusteella (Airaksinen ym., 2011). Metsän tuottoarvo on tulevaisuudessa toteutuvien tulojen ja menojen nykyarvojen välinen erotus. Menetelmässä ei kuitenkaan määritetä arvoa erikseen puustolle ja maapohjalle, vaan arvioitava kohde on sisällöltään yhtenäinen kokonaisuus, jota käytetään kestävästi ja pysyvästi metsätalouteen. Täten edellä mainitut menot ja tulot ovat erillisiä eriä, jotka diskontataan päättymättömänä sarjana arvohetkeen. Kuvassa 10 on havainnollistettu, miten tuottoarvo lasketaan yksinkertaisessa tapauksessa.



Kuva 10. Tuottoarvomenetelmän periaate. Kuvassa keltaiset pylväät kuvaavat tuloeriä ja violetinpunaiset pylväät menoeriä. Kun yhteenlasketuista diskontatuista tuloista vähennetään yhteenlasketut diskontatut menot, saadaan nettotulojen nykyarvo, jota kuvaa vihreä pylväs (Airaksinen ym., 2011, s. 15).

Kustannukset ja tuotot toteutuvat yleensä pitkällä aikavälillä, mutta eivät samaan aikaan (Airaksinen ym., 2009). Tuloja saadaan harvennus- ja päätehakkuista. Sen sijaan menot muodostuvat hallintokuluista sekä uudistamis- ja taimikonhoitokustannuksista. Näin ollen tuottoarvoon vaikuttavat diskonttauksessa käytettävä laskentakorko sekä nettotulojen ajallinen etäisyys ja suuruus. Käytännössä tuloja saadaan vain 2–3 kertaa metsän kiertoajan kuluessa ennen seuraavan puusukupolven istutusta. Menoeriä muodostuu kuitenkin useammin kuin tuloja metsänhoitomenoista ja päätehakkuun yhteydessä tehtävästä metsän uudistamisesta. Arvioinnissa tarvittavat meno- ja tuloerät löytyvät metsiköiden kehitysennusteista.

Laskentateknisesti tuottoarvomenetelmä perustuu oletukseen, että arvioitavalle metsälle saadaan paras tuotto, kun sitä käytetään vain puutuotannossa (Airaksinen ym., 2011). Käyttötarkoituksen vuoksi suunnitelmia laaditaan pidemmälle aikavälille kuin yleensä elinkeinotoiminnassa, minkä takia metsän arvo suunnittelujakson lopussa on puuttoman maan arvo seuraavan kiertoajan alussa eikä omaisuuden jäännöserä. Tällöin metsän kokonaisarvoon vaikuttavat valitut meno- ja tuloajankohdat sekä korkokanta. Tuottoarvo lasketaan kaavasta

$$Tuottoarvo = \sum_i \sum_j \frac{a_{ij}}{(1+r)^n}, \quad (1)$$

missä a_{ij} on metsiköstä i saatava j :s nettotulo ja $\frac{1}{(1+r)^n}$ on laskentakorkokannan r ja nettotulon j saantihetken n (vuotta) perusteella saatava diskonttaustekijä.

Keskeisin edellytys metsän luotettavan tuottoarvon määrittämiselle on arviointikohteen ajantasainen metsäsuunnitelma, josta löytyvät esimerkiksi toimenpide- ja hakkuusuositukset yhdelle kiertoajalle (Airaksinen ym., 2009). Tarkempaan toimenpiteiden ajankohdan ja puuston kehityksen ennustamiseen on olemassa laskentajärjestelmiä, joissa käytetään lähtötietona metsän nykytilaa (Airaksinen ym., 2011). Markkina-arvon määrittäminen ei kuitenkaan voi perustua pelkästään olemassa olevaan metsäsuunnitelmaan, vaan arvioijan on tarkistettava myös, onko suunnitelma edelleen ajantasainen. Mikäli suunnitelma ei ole ajantasainen, puuston kasvun kehityksen ennustamista ei voida tehdä luotettavasti, jolloin metsän laadukas arviointi ei ole mahdollista.

Toisaalta metsän arvon arviointiin vaikuttavista metsän hoitokustannuksista ei ole olemassa ajantasaista tietoa ja ennustaminen on vaikeaa, joten suhdannevaihteluiden vaikutuksen poistamiseksi sovelletaan pidemmän aikavälin keskimääräisiä kustannuksia (Airaksinen ym., 2011). Laskennassa käytettävät kantohinnat määritetään samalla periaatteella. Tuottoarvomenetelmää käytetäänkin eniten suurten metsätilojen arvioinnissa, koska tällaisissa kohteissa eri ikäluokkien osuus kokonaispinta-alasta on kohtuullisen optimaalinen eivätkä menot ja tulot vaihtelee jatkuvasti. Verotuksen vaikutuksen huomioon ottaminen jää arvioijan harkittavaksi. Sen sijaan rahan arvonmuutoksia ei oteta laskelmissa huomioon, vaan metsä arvioidaan valitun ajankohdan rahan arvon mukaan.

Tuottoarvomenetelmän erikoistapaus on hakkuumahtomenetelmä, jossa oletetaan, että arvioitavasta kohteesta myydään kaikki myyntikelpoinen puusto lakien ja metsänhoitosuosituksen mukaan lähitulevaisuudessa (Paananen ym., 2009). Tällöin ei oteta huomioon tasaisia tuloja ja kestävänsä metsänhoidon periaatetta. Laskennan tuloksena saadaan metsän välittömästi hakattavissa olevan puuston arvo, jota kutsutaan myös hakkuumahdoksi. Jäljelle jäänyt puusto on tuottoarvon lähtökohta seuraavalla kaudella, jolloin voidaan soveltaa myös säännöllisen tulovirran periaatetta. Hakkuumahtomenetelmä sopii parhaiten tilanteisiin, joissa hakkuukelpoisesta puusta halutaan rahaa mahdollisimman nopeasti.

3.1.2 Summa-arvomenetelmä

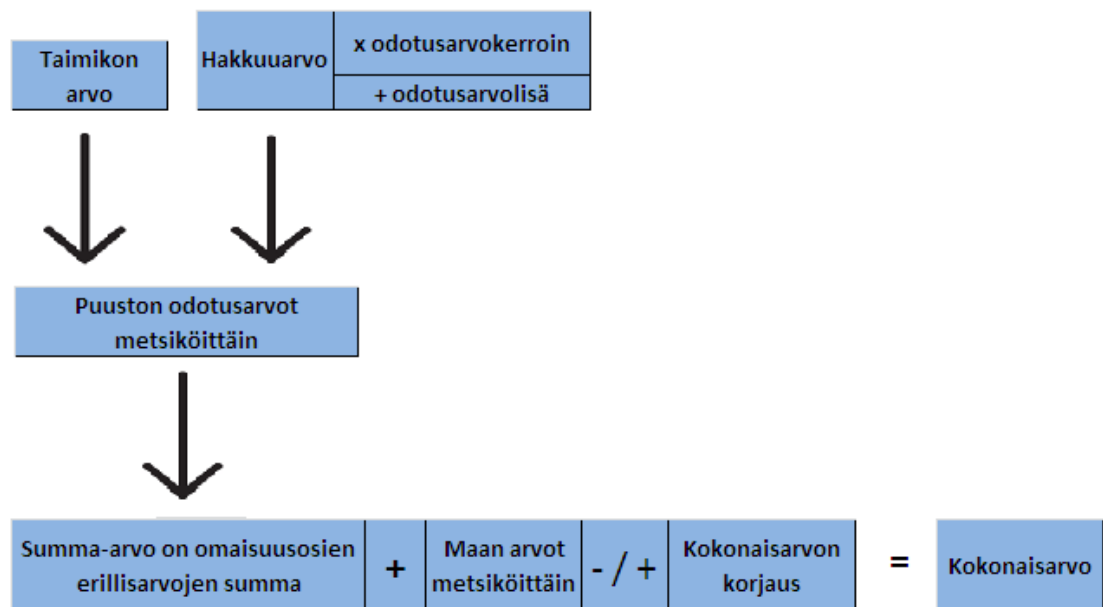
Tuottoarvomenetelmää soveltava summa-arvomenetelmä on yleisin arviointimenetelmä metsätaloudessa (Paananen ym., 2009). Metsän arvonmäärittästä summa-arvomenetelmällä on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 11. Menetelmässä lasketaan yhteen metsän omaisuusosien erillisarvot, jotka lasketaan erikseen uudistuskypsien metsien puustolle, kasvatusmetsien puustolle, taimikoille ja maapohjalle jokaisessa metsikössä. Puuston arvonmäärittäykseen vaikuttaa puuston kehitysvaihe, jolloin puuston arvo määritetään joko uudistuskypsän metsän hakkuuarvona kantohintojen mukaan, kasvatusmetsän puuston odotusarvona tai taimikon arvona.

Jos puuston odotusarvo lasketaan odotusarvolisän avulla, laskelmassa erotetaan toisistaan kasvatusmetsän puuston hakkuu- ja odotusarvo (Airaksinen ym., 2011). Tulosten soveltaminen on myös helpompaa, kun koko puuston hakkuuarvosta on erotettu heti hakattavissa olevan puuston arvo. Tällöin voidaan käyttää samoja kantohintoja sekä heti hakattavissa olevalle puustolle että koko pystypuustolle. Arvioinnissa hinnaksi valitaan päivän hinta, mikäli arvohetken markkinahinta eroaa huomattavasti pidemmän aikavälin keskiarvosta.

Odotusarvopuuston, taimikon ja maapohjan arvonmäärittästä varten on olemassa summa-arvomenetelmän aputaulukoita, joissa on kasvatusmetsien odotusarvolisät ja ker-toimet sekä taimikoiden ja maapohjien arvot. Aputaulukot on tehnyt Metsätaloudenke-

hittämiskeskus Tapio, joka on laskenut tarvittavat taulukkoarvot metsämaiden viljavuusluokille ja pääpuulajeille jokaisella metsäkeskusalueella (Paananen ym., 2009). Taulukkoarvot perustuvat alueellisiin, hyvin ja säännöllisesti hoidettujen tyyppimetsiköiden keskimääriisiin kehityssarjoihin (Airaksinen, 2008). Metsän tuottoennusteiden aikaväli on kuitenkin pitkä, mikä aiheuttaa epävarmuutta niiden toteutumisessa. Lisäksi taulukot ovat osin epäjohdonmukaisia, koska esimerkiksi Pohjois-Suomessa taimikoiden taulukkoarvot on laskettu matalilla koroilla karuille alueille.

Koko metsätilan arvo on metsiköiden arvojen summa (Airaksinen, 2008). Metsän kokonaisarvolle tehdään vielä harkinnanvarainen kokonaisarvon korjaus, koska käytännön arviointityössä on havaittu metsän erillisarvojen summan olevan korkeampi kuin todellinen markkina-arvo. Korjauksessa otetaan huomioon sellaiset metsän arvoa nostavat tai laskevat tekijät, joita ei ole otettu huomioon metsiköiden arvonmäärittämisessä. Näistä tekijöistä ja niiden vaikutuksista korjauksen määrittämiseen on kuitenkin vain vähän tietoa, eikä yksityiskohtaista ohjetta ole olemassa. Tällaisia tekijöitä on pyritty tunnistamaan metsäkiinteistömarkkinoilta saatavaa tietoa analysoimalla (Airaksinen ym., 2011). Mahdolliset erityisarvot ja oikeudet arvioidaan kuitenkin erikseen. Lopullinen korjaus määräytyy arvioijan asiantuntemuksen ja kokemuksen perusteella. Arvonkorjauksen jälkeen saadaan metsän eli käyttöyksikön jakamaton kokonaisarvo.



Kuva 11. Metsän arvonmäärittäminen summa-arvomenetelmällä.

3.1.3 Kauppa-arvomenetelmä

Yleisin arviointimenetelmä kiinteistöarvioinnissa on kauppa-arvomenetelmä, joka perustuu arviointikohdetta vastaavien vertailukelpoisten kauppojen hintatutkimukseen. Menetelmän oletuksena on, että kiinteistömarkkinat toimivat vapaasti. Tällöin kiinteistöistä maksettujen hintojen voidaan olettaa kuvaavan oikein kohteiden käypiä arvoja ja sekä myyjän että ostajan näkemyksiä markkinatilanteesta.

Kauppa-arvomenetelmää sovellettaessa on päätettävä edustavien metsäkauppojen määrä (Airaksinen ym., 2011). Yksiselitteisiä ohjeita ei ole olemassa, vaan arvioijan on itse valittava edustavat kaupat arvioitavan metsätilan analyysin avulla. Vaikka metsän arvi-

ointiprosessi kauppa-arvomenetelmää sovellettaessa näyttäisi analyysin perusteella selkeältä, ongelmia voivat aiheuttaa esimerkiksi metsätilakauppojen pieni määrä lähialueella. Tällaisessa tapauksessa vertailukelpoisia kauppiaa voi etsiä laajemmalta alueelta, koska yleensä metsän tuotto-olosuhteet vaihtelevat vain vähän lähialueilla.

Toinen ongelma voi olla muutokset lainsäädännössä (Paananen ym., 2009). Tällöin edustavia kauppiaa ovat mahdollisesti vain ne kaupat, jotka on tehty viimeisimpien lainmuutosten jälkeen. Tärkeitä kriteerejä edustavalle kaupalle ovat mm. kaupanteon ajankohta, kokoluokka, kiinteistön metsävaratunnukset, sijainti ja käyttötarkoitus (Airaksinen ym., 2011). Erityisesti on huolehdittava siitä, ettei kauppa-aineistossa ole sukulaisten tai muiden henkilöiden tekemiä kauppiaa, joiden hinnasta on sovittu asianosaisten kesken ilman varsinaista arviointia. Kauppojen yksityiskohtaisessa tutkimuksessa on myös selvitettävä, onko kaupassa myyty myös muuta kiinteistöön kuuluvaa omaisuutta kuin metsätalousmaata. Jos näin on, on arvioitava niiden vaikutus kauppahintaan tai jättää ne pois vertailuaineistosta.

Käytännössä kaikkia yksittäiseen kauppaan vaikuttavia tekijöitä ei ole mahdollista selvittää, jolloin arvioijan on varmistettava, että valitut kaupat ovat vertailukelpoisia (Paananen ym., 2009). Esimerkiksi pelkän hintapyynnön sisältävät alustavat kaupat on jätettävä kauppahintatutkimuksen ulkopuolelle. Kauppahintatutkimuksen tukena voidaan käyttää myös rekisteritiedoista koostettuja metsätilojen kauppahintatilastoja.

Käytännössä kauppa-arvomenetelmän soveltaminen on joskus ongelmallista, koska hyvän vertailukauppa-aineiston kokoaminen on työlästä, vertailukelpoisia kauppiaa ei löydy aina riittävästi ja kauppojen metsävaratunnuksia koskevia tietoja ei ole saatavilla (Paananen ym., 2009). Toisaalta, koska menetelmää ei ole käytetty laajasti metsän arvonnäilytyksessä, myös vakiintunut arviointitapa puuttuu. Kuitenkin menetelmää on hyödynnetty muissa metsän arviointimenetelmissä. Esimerkiksi summa-arvomenetelmässä tarvittavan kokonaisarvon korjauksen suuruutta arvioitaessa kauppa-arvomenetelmä on hyvä vaihtoehto.

Kauppahintatilastoja analysoimalla kauppa-arvomenetelmästä on johdettu myös muita menetelmiä (Paananen ym., 2009). Metsänarvioinnissa luotettavia menetelmiä ovat kokemusperäinen menetelmä ja matemaattiset monimuuttujamenetelmät. Kokemusperäisessä menetelmässä kauppahintaan vaikuttavien tekijöiden suhteellinen vaikutus laskeaan kokemuksista kertyneen tiedon pohjalta ja on tietysti arvioitsijalle vaativampi kuin muut menetelmät. Matemaattisessa monimuuttujamenetelmässä vertailukauppojen keskiarvon sijaan käytetään hintamallia, jonka tavoitteena on ennustaa todennäköisintä kauppahintaa keskeisillä metsävaratunnuksilla.

3.2 Puuston tilavuuden arviointi

Metsän arvioinnissa mahdollisesti tarvittavan markkina-arvon laskemiseksi voidaan selvittää puuston määrä eli tilavuus (m^3/ha) mahdollisimman tarkasti (Airaksinen ym., 2011). Kokonaispuusto voidaan jakaa hukkapuuhun ja käyttöpuuhun, joka voidaan luokitella edelleen eri puutavaralajeihin. Arvokkain puutavaralaji on tukkipuu, jonka kantohinta on 2–4 kertaa suurempi kuin kuitupuulla (Paananen ym. 2009).

Yleensä metsän arvonnäilytyksessä riittää tieto alueen keskimääräisestä puuston määrästä, mutta arvokkaimman puuston määrä on arvioitava tarkemmin erikseen (Airaksinen ym., 2009). Perinteinen menetelmä on kuvioittainen relaskooppiarviointi, jossa otetaan edustava otos relaskooppikoealoja tasaisesti koko metsän alueelta jokaiselta kuviol-

ta (Paananen ym., 2009). Mittaukset tehdään relaskoopilla, joka on optinen kulmamitta, jonka päässä on hahlo. Yksittäisen kuvion keskeltä valitaan metsän keskiarvoa vastaava kohta, jossa laskija pyörii akselinsa ympäri täyden kierroksen. Hahloa pidetään rinnan eli noin 1,3 m:n korkeudella. Jos rungon halkaisija ei ole yhtä suuri kuin hahlo, puuta ei lasketa mukaan pohjapinta-alaan. Muussa tapauksessa puu on sopiva. Rajatapauksista lasketaan mukaan joka toinen.

Jos erilaisia puustoisia kuvioita on vain yksi tai muutamia, hyvä vaihtoehto puuston määrän arvioimiseksi on systemaattinen linjoittainen otanta (Paananen ym., 2009). Tällöin koealoja otetaan tasavälein jokaiselta hehtaarilta. Mitattava matka kävellään kuvioiden poikkisuuntaan. Puiden kokonaispohjapinta-alan (m^2/ha) ohella selvitetään puulajien keskipituus. Tyypillisesti pituus arvioidaan jokaiselta koealalta erikseen.

Tarvittavan otoksen suuruuteen vaikuttavat metsäkuvion koko ja puuston epätasaisuus (Airaksinen 2008). Mikäli puusto on jakaantunut metsään epätasaisesti ja arvioitava kuvio on iso, tarvitaan koealamittauksia huomattavasti enemmän kuin normaalissa tapauksessa. Harvinaisempien erikoispuutavaralajien määrää ei kuitenkaan arvioida kuviottain, vaan mahdollinen esiintymä otetaan huomioon erikseen kokonaisarvioinnissa.

Puun määrän arvioinnissa merkittävin virhelähde on väärin valitut koealat (Paananen ym., 2009). Valitut koealat voivat olla keskittyneet selvästi yksittäiselle alueelle tai koealojen määrä ei ole riittävän suuri. Maastotyövaiheessa voidaan tehdä myös systemaattisia tai satunnaisia lukuvirheitä. Lisäksi kuviokohtaiset erot arvioidussa puuston määrässä vaihtelevat normaalisti 15–20 prosenttia, kun eri henkilöt arvioivat puuston määrää samoilla kuvioilla. Jos arvioitavia kuvioita on tilastollisesti merkittävä määrä, ero arvioissa on pienempi kuin 10 prosenttia. Muutaman kuvion sisältävän metsän puuston arvioinnissa on siten oltava erityisen huolellinen. Yksi vaihtoehto suurempien virheiden välttämiseksi on mitata mittanauhalla niin sanottujen rajapuiden lukutarkkuus koealalla.

Koska relaskoopin käyttöön perustuvilla menetelmillä saadaan hitaasti ja epäluotettavasti selville puuston määrä, on tutkittu muita menetelmiä, joita ovat esimerkiksi: yleiseen tapaukseen sopiva matemaattinen malli (Sun ym., 2016 & Olschofsky ym., 2016), mittaussaineistosta määritettävä matemaattinen malli (Kankare ym. 2016), ellipsin sovitus mittaussaineistoon (Bu ym., 2016) ja lineaarinen malli (Forsman ym., 2016). Tulokset osoittavat, että tilavuuslaskennan luotettavuus paranee huomattavasti, kun käytetään jotain edellä mainituista menetelmistä.

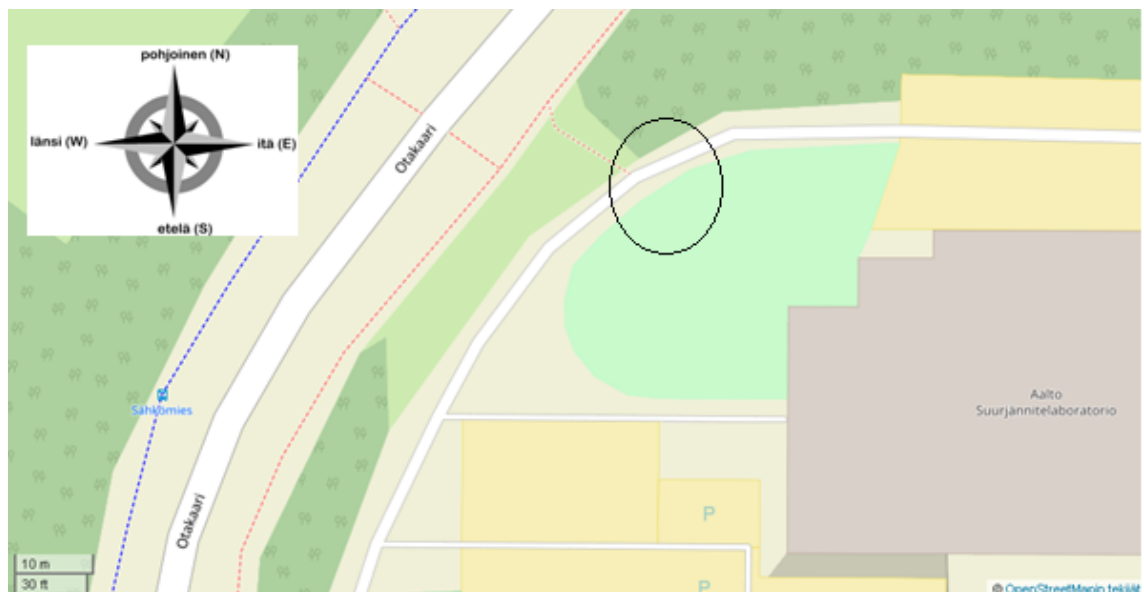
4 Puuston arvonmääritys maalaserkeilausaineistolla

Tässä luvussa esitetään yksityiskohtaisesti diplomityön soveltavan osan vaiheet. Kahdessa ensimmäisessä alaluvussa (4.1 ja 4.2) käsitellään mittausten taustaa, keilausalueen valintaa ja selostetaan, miten mittaukset käytännössä tehtiin. Seuraavassa alaluvussa 4.3 kerrotaan mittausaineiston käsittelystä. Viimeisessä alaluvussa 4.4 tarkastellaan, millä tavalla tässä tutkimuksessa arvioitiin mittausmenetelmän vaikutusta puuston arvonmääritykseen.

4.1 Tutkimusasetelma

Tutkimuksessa lähtökohdaksi otettiin kuvitteellinen tilanne: on määritettävä heti hakattavissa olevan puuston arvo maalaserkeilauksen avulla (yhden hehtaarin) kokoiselle metsäkiinteistölle. Puita tällä kiinteistöllä on 400 kappaletta, joista 70 prosenttia (280 kpl) on mäntyjä ja 30 prosenttia (120 kpl) koivuja. Lisäksi merkittävästi yksinkertaistetaan oletetaan, että kuvitteellisessa metsässä on pelkästään samanlaisia puita kuin ne, joille oli käytettävissä maalaserkeilauksen tulokset. Metsäpalstan muodolla tai pinta-alalla ei ole merkitystä, koska tutkimuksen kohteena on vain puuston arvonmääritys eikä metsän kokonaisarvon määrittäminen.

Maalaserkeilauksen mittausaineistoja oli käytettävissä puille, jotka sijaitsivat Espoon Otaniemessä Aalto-yliopiston suurjännitelaboratorion edustalla osoitteessa Otakaari 5. Tässä tutkimuksessa tarkemman analyysin kohteeksi valittiin yksi koivu ja yksi mänty. Puiden tarkempi sijainti toisiinsa nähden näkyy kuvissa 12 ja 13. Kuvassa 13 kohdemänty on kuvan oikeassa laidassa kahden tähyspallon ja kohdekoivu aivan kuvan keskellä toisen männyn ja tähyspallon välissä. Mittausalue on varsin avonainen, joten kaikki tähykset ja mitattavat puut olisivat näkyvissä mittausaineistossa. Mittauksissa oli käytetty Faron Focus 3D 120 -laserkeilainta ja viittä tähyspalloa, jotka sijoitettiin tasaisesti puiden ympärille. Mänty mitattiin viidestä ja koivu kuudesta eri suunnasta, jotta mittausaineiston analysointivaiheessa oli mahdollista tehdä puiden todellista runkoa mahdollisimman hyvin vastaava 3D-malli



Kuva 12. Kartta koealueesta. Kuvassa mitatut puut ovat mustan ympyrän sisällä tien eteläpuolella (vrt. kuva 13).



Kuva 13. Koejärjestely yhden keilauksen aikana (vrt. kuva 12). Kohdemänty on kuvan oikeassa laidassa kahden tähyspallon ja kohdekoivu aivan kuvan keskellä toisen männyn ja mittauslaitteen välissä. Yksi tähyspallo on merkitty kuvassa nuolella (© Matti Vaaja).

4.2 Mittaukset

Mänty ja koivu oli mitattu maalaserkeilausmenetelmällä 31.8.2016. Mittaukset tekivät Aalto-yliopiston Rakennetun ympäristön laitoksen tutkijat osana laajempaa tuulen vaikutuksen tutkimiseen liittynyttä mittauskampanjaa. Kaikissa mittauksissa resoluutio oli 3,1 mm/10 m. Tässä työssä käytettiin kaksilla tuuliolosuhteilla eli tyynellä ja tuulisella säällä saatuja mittauksia. Mittaukset tehtiin tyynellä ja tuulisella säällä mahdollisimman samalla tavalla tuulen vaikutuksen selvittämiseksi.

Taulukossa 1 on esitetty tuulen nopeus (m/s) sekä tyynellä että tuulisella säällä. Tuulilukemat vaihtelivat mittausalueelle sijoitetun sääaseman havaintojen mukaan nolasta lähes neljään metriin sekunnissa. Tyynellä säällä tuulen nopeuden mediaani oli 0,3 m/s ja keskiarvo 0,43 m/s. Sen sijaan tuulisella säällä tuulen nopeuden mediaani oli 2,55 m/s ja keskiarvo 2,62 m/s.

Taulukko 1. Tuulen nopeus sekä tyynellä että tuulisella säällä tehtyjen keilausten aikana.

	Tyyri	Tuulinen
Keilaus	Tuulen nopeus m/s	Tuulen nopeus m/s
1	0,3	3,1
2	0,3	2,4
3	0,3	1,4
4	0	2,7
5	0,7	2,4
6	1	3,7

Jokaisen mittauksen jälkeen kohdealueesta tehtiin harmaasävykuva puista heijastuneiden valosignaalien intensiteettiarvojen perusteella, jotta pistepilvien käsittelyvaiheessa olisi helpompi hahmottaa tutkittavien puiden sijainti muiden ympärillä olevien puiden

seassa. Kuvien avulla voitiin myös tarkistaa, kattavatko tilavuuden määrittämistä varten pistepilvistä erotetut puun osat rungon ympärysmittan kokonaisuudessaan.

Molempien puiden rungon ympärysmitta mitattiin myös mittanauhalla 29.5.2017. Mittaukset tehtiin neljältä eri korkeudelta. Alin mittaustaso pyrittiin valitsemaan vastaamaan mahdollisimman hyvin laserkeilausten käsittelyssä valittua katkaisukohtaa. Seuraavat kaksi tasoa ovat metrin välein. Neljännet tasot ovat noin 3 metriä arvioitun katkaisukohdan yläpuolella.

4.3 Mittausaineiston analysointi

Maalaserkeilauksista saatujen pistepilviaineistojen jälkikäsittelyssä käytettiin seuraavia ohjelmia:

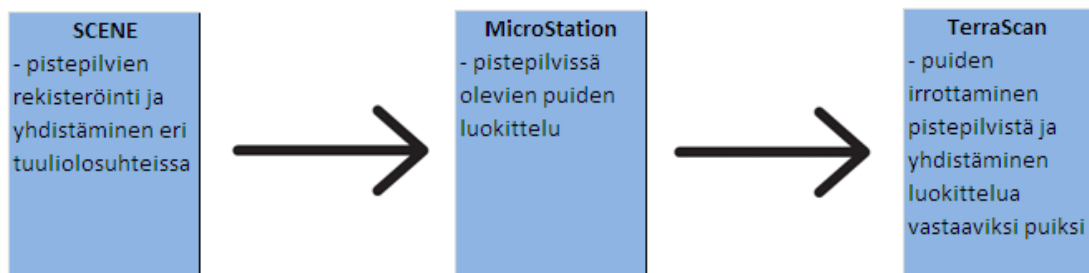
- SCENE (FARO)
- MicroStation (Bentley Systems) ja
- TerraScan (Terrasolid).

SCENE on suunniteltu erityisesti laserkeilaimien Faro Focus ja Freestyle tuottamien mittausaineistojen jatkokäsittelyyn. Se tunnistaa mittaustähykset automaattisesti ja sekä rekisteröi että orientoi erilaiset pistepilvet keskenään. Käyttäjäystävällisessä ohjelmassa rekisteröinti ja orientointi onnistuvat myös ilman tähyksiä.

MicroStation on 3D-mallinnusohjelmisto, jolla voidaan käsitellä vektorigrafiikkainformaatiota joko 2D- tai 3D-muodossa. MicroStation-ohjelmaa voi myös käyttää käyttöliittymänä muihin tietokantoihin. Lisäksi siihen on mahdollista liittää muita sovelluksia, kuten käytetty TerraScan.

TerraScan on tarkoitettu laserkeilausaineistojen jatkokäsittelyyn. Ohjelmalla on mahdollista visualisoida ja mallintaa esimerkiksi rakennuksia, teitä tai yksityiskohtia luonnosta. Se soveltuu myös suurien mittausaineistojen muokkaamiseen.

Käsittelyn prosessikaavio on esitetty kuvassa 14. Ensimmäisessä vaiheessa aineistojen rekisteröinti ja yhdistäminen tehtiin erikseen tuulisella ja tyynellä säällä mitatuille pistepilville. Analysointi aloitettiin SCENE-ohjelmalla rekisteröinnillä, jossa tähyspalloja tunnistettiin jokaisesta keilauksesta. Rekisteröinnin tulokset löytyvät alla olevista kuvista 15 ja 16. Tähyspalloihin osuneiden pisteiden poikkeama toisistaan oli suurimmillaan 8,74 mm. Poikkeama on pienempi tuulisen sään olosuhteissa kuin tyynen sään olosuhteissa. Tuuli ei siis vaikuttanut tähyspallojen ja keilaimen sijaintiin.



Kuva 14. Mittausaineiston jälkikäsittelyn prosessikaavio.

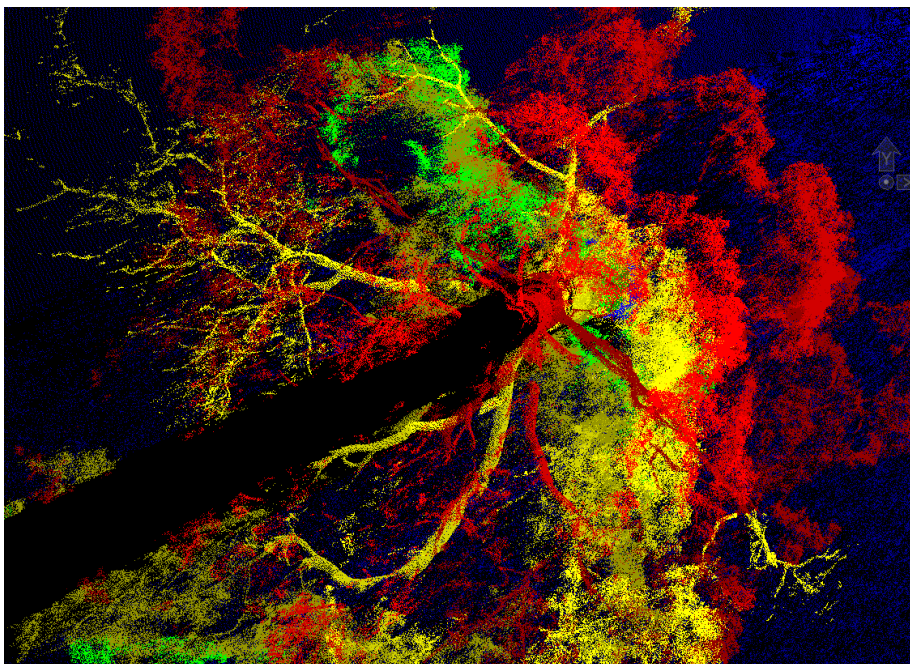
Distance / Angular Statistics					
Mean:	3.35	[mm]	0.000	[°]	Deviation: 1.62 [mm] 0.000 [°]
Min:	0.71	[mm]	0.000	[°]	Max: 8.74 [mm] 0.000 [°]

Kuva 15. Rekisteröintitulokset tyynellä säällä mitatuille pisteille SCENE-ohjelmalla.

Distance / Angular Statistics					
Mean:	3.30	[mm]	0.000	[°]	Deviation: 1.48 [mm] 0.000 [°]
Min:	0.85	[mm]	0.000	[°]	Max: 7.68 [mm] 0.000 [°]

Kuva 16. Rekisteröintitulokset tuulisella säällä mitatuille pisteille SCENE-ohjelmalla.

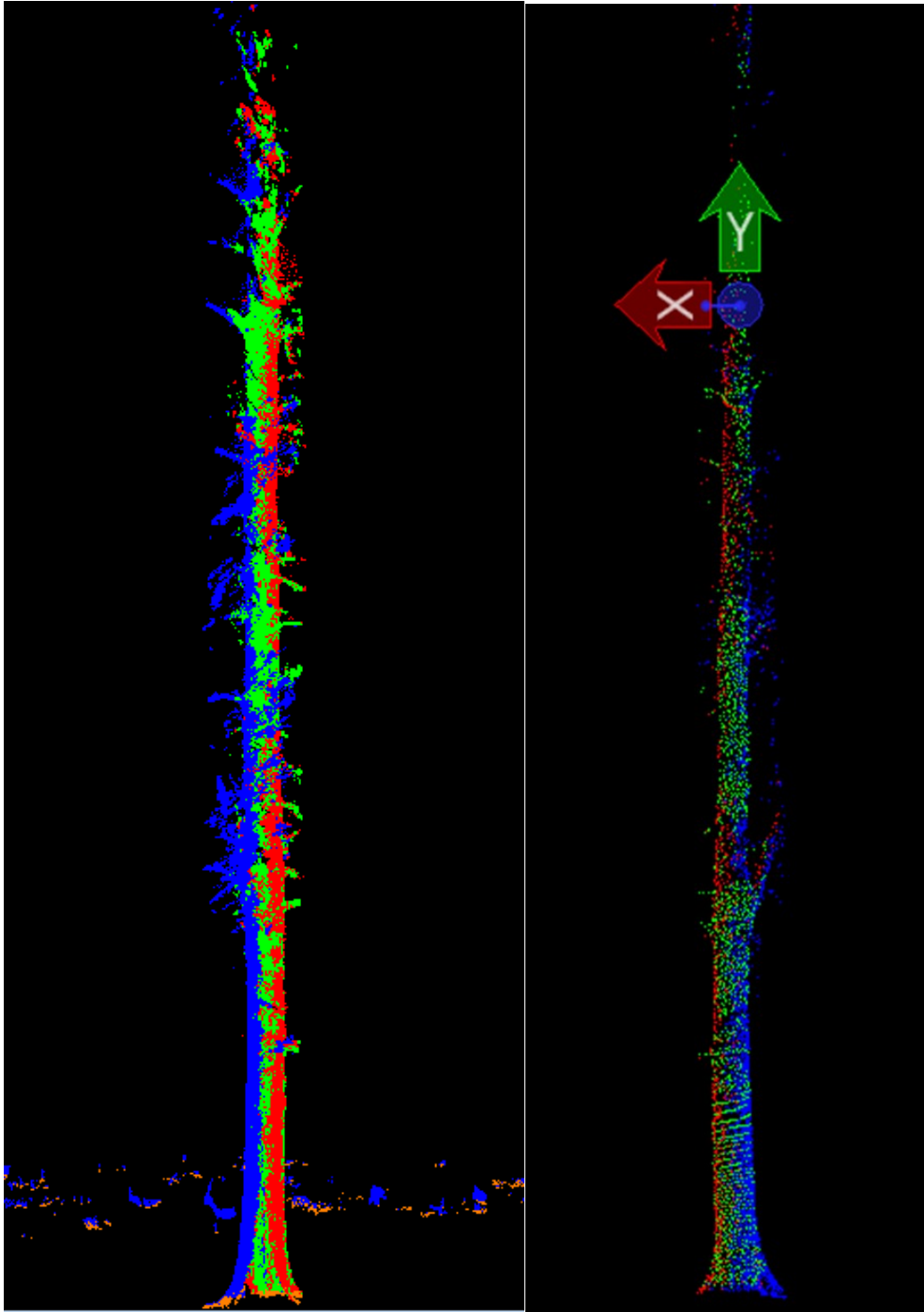
Mittausaineistoille olisi ollut mahdollista tehdä myös suodatus ennen rekisteröintiä ja yhdistämistä. Tyypillisesti pistepilvissä esiintyy aina kohinaa ja muita häiriöitä, jotka voidaan poistaa suodatuksen avulla. Nyt suodatusta ei kuitenkaan tehty, koska siitä saatavat hyödyt olisivat olleet pienet verrattuna tutkimuksen tavoitteisiin. Kuvassa 17 on visualisoitu suodattamattomasta aineistosta tuulisella/tuulettomalla säällä mitattu mänty.



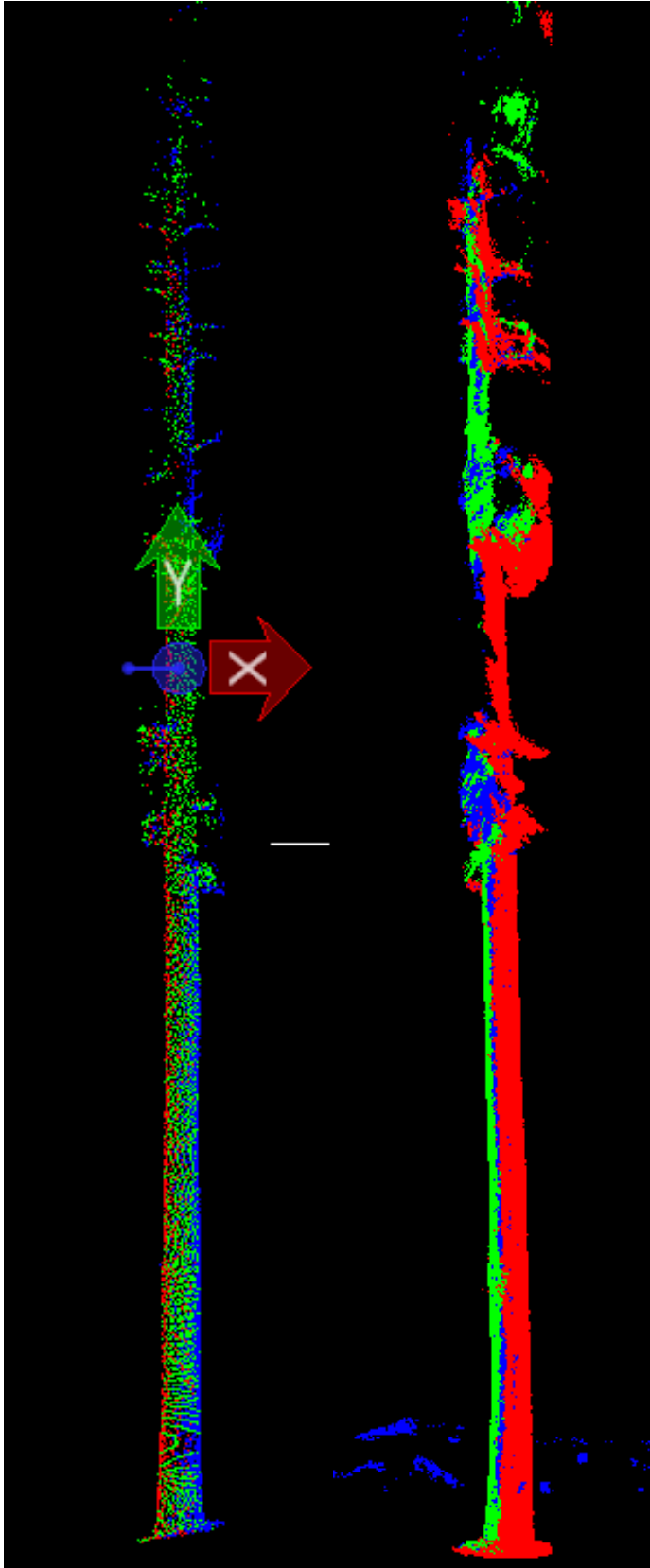
Kuva 17. Laserkeilattu mänty visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla (ylhäältä päin katsottuna). Pistepilvi on värjätty korkeusarvon mukaan.

Rekisteröinnin ja keilausten yhdistämisen jälkeen mittausaineistot luokiteltiin MicroStation-ohjelmistolla tilavuuden laskentaa varten neljään luokkaan: koivu tyynellä säällä, mänty tyynellä säällä, koivu tuulisella säällä ja mänty tuulisella säällä. Luokittelua varten valittiin molemmista keilausryhmistä neljä pistepilveä, jotka kattoivat puun rungon parhaiten. Jokaisesta pistepilvestä irrotettiin TerraScan-ohjelmistolla sekä koivua että mäntyä edustavat pisteet valitsemalla vain kyseisestä puusta tai puun välittömästä läheisyydestä mitatut pisteet. Nämä mittauspisteet siirrettiin toiseen luokkaan kuin muut pisteet. Luokittelun jälkeen irrotetut mittausaineistot yhdistettiin siten, että ne muodostivat neljä edellä määritellyn luokittelun mukaista puuta.

Kuvissa 18 ja 19 näkyy koivun ja männyn runkojen visualisointi sekä tuulisella että tyynellä säällä mitatuista aineistoista. Tuulisella säällä mitatussa aineistossa puut olivat e kuin tyynen sään mittausaineistossa. Tuulen vaikutus oli suurin latvassa.



Kuva 18. Koivun runko tuulisella (vasemmalla, suurempi pistekoko) ja tyynellä (oikealla) säällä mitattujen aineistojen perusteella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla. Kuvassa ruskeat pisteet on mitattu maanpinnasta. Siniset, vihreät sekä punaiset pisteet ovat eri pistepilvistä irrotettuja ja eri suunnista saatuja havaintoja.



Kuva 19. Männyn runko tuulisella (oikealla, suurempi pistekoko) ja tyynellä (vasemmalla) säällä MicroStation-ohjelmistossa. Kuvassa siniset, vihreät sekä punaiset pisteet kuvaavat eri pistepilvistä irrotettua ja eri suunnista mitattuja heijastuksia.

4.4 Puuston arvon laskeminen

Työn tehtävän määrittelyn (luku 4.1) mukaisen esimerkkikiinteistön puuston kokonaistilavuuden tarkemman mittaustavan vaikutusta metsän arvoon voidaan tutkia sekä summa-arvo- että tuottoarvomenetelmällä. Summa-arvomenetelmällä puuston arvo saadaan helposti, kun puuston tilavuus kerrotaan hakkuuajankohdan mukaisella puulajikohtaisella hinnalla. Tällöin mittaustavan vaikutusta metsän kokonaisarvoon voidaan helposti analysoida. Tuottoarvomenetelmässä lasketaan tulevaisuudessa puustosta saatavien nettotulojen nykyarvo. Koska tutkimusasetelmassa metsäkiinteistön puut ovat heti hakattavissa, puuston nykyarvo lasketaan samalla tavalla kuin summa-arvomenetelmässä. Laskentakoron vaikutusta metsän kokonaisarvoon tutkitaan siten, että tarkastellaan puista saatavan tulon syntymisajankohdan vaikutusta. Tässä yhteydessä oletetaan, että puun hinta on sama nettotulon syntymisajankohtana, koron vaihteluväli on 4–8 prosenttia, tuloeriä on vain yksi eikä menoeriä ole.

Kauppa-arvomenetelmä perustuu edustavien kauppojen perusteella määritettävään kiinteistön markkina-arvoon. Koska metsäkiinteistön maapohjan arvo ei ole tutkimuksen kohteena, mittaustavan vaikutusta metsän arvoon ei tutkita kauppa-arvomenetelmällä. Lisäksi maalaserkeilaukseen perustuvia mittaustuloksia voidaan soveltaa vain summa-arvo- ja tuottoarvomenetelmissä.

5 Tulokset

Laserkeilaustulosten perusteella määritetyt puiden tilavuudet ja esimerkkikiinteistön puuston arvioinnin tulokset esitellään kahdessa seuraavassa alaluvussa (5.1 ja 5.2). Tarkeemman mittaustavan vaikutuksia metsän kokonaisarvoon arvioidaan alaluvussa 5.3.

5.1 Puiden tilavuus

Koivun ja männyn tilavuus laskettiin manuaalisesti. Käytännössä molemmille puille määritettiin ensin rungon halkaisija pääsääntöisesti metrin välein mahdollisimman korkealle. Latvassa pistepilvet ovat niin epämääräisiä, ettei halkaisijan määrittäminen luotettavasti ole mahdollista.

Halkaisijan määrittämistä vaikeutti puun rungon epäsymmetrinen muoto. Koska rungon poikkileikkauksen muoto on aina muu kuin ympyrä, katkaistun kartion tilavuuden laskemisella rungon tilavuutta ei saada oikein.

5.1.1 Rungon halkaisija

Puun halkaisijaa määritettäessä kullakin korkeudella poikkileikkaustason mittaussaineistoon sovitettiin ympyrä, jonka halkaisija mitattiin TerraScan-ohjelmistossa. Halkaisijan alin määrittystaso valittiin korkeudeksi, josta puu todennäköisesti katkaistaisiin. Sekä tyynen että tuulisen sään mittaussaineistoista määritetyt männyn ja koivun runkojen halkaisijat korkeuden funktiona on esitetty kuvissa 20 ja 21.

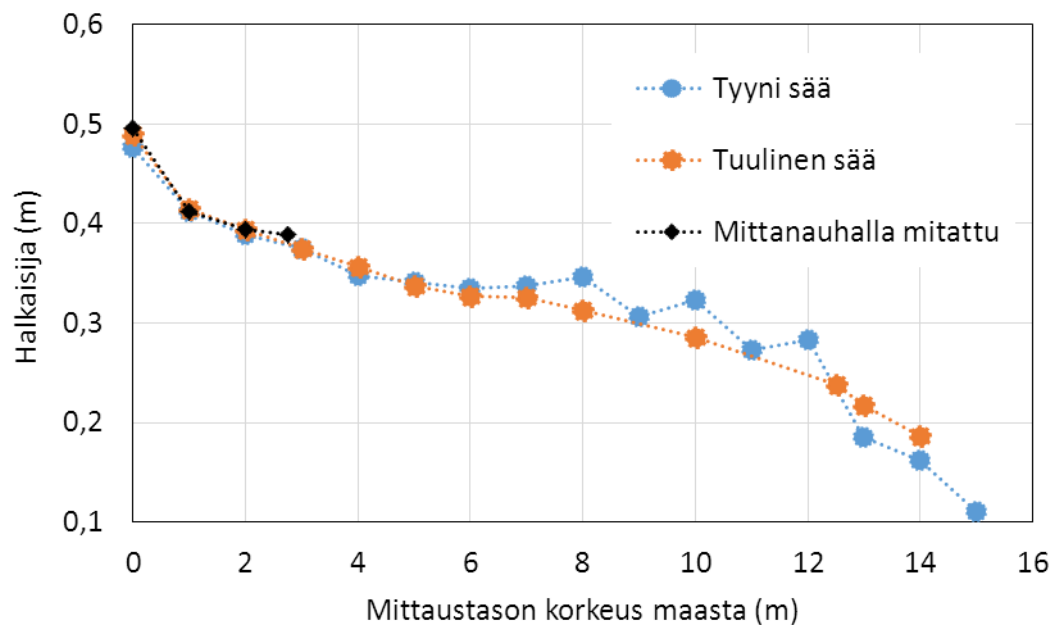
Tuulisen sään mittaussaineistossa männyn halkaisija käyttäytyy korkeuden funktiona ennako-odotusten mukaisesti (kuva 20), mutta tyynen sään aineistosta 7 metrin yläpuolella määritetty halkaisija vaihtelee enemmän korkeuden funktiona. Puun halkaisijan paikallinen suurentuminen latvaa kohti edettäessä ei tietysti ole mahdotonta. Kuitenkin kun tuulisella säällä mitattu halkaisija pienenee monotonisesti korkeuden funktiona, tyynen sään mittaustuloksista määritellyn halkaisijan korkeuskäyttäytyminen on varsin epätodennäköistä. Tämä epärealistinen tulos aiheutunee maalaserkeilauksen tulosten aineiston käsittelystä. Puun vanha vaurioituminen (kuva 23) saattaa myös vaikeuttaa laserkeilausmittausaineistojen analysointia.

Tyynellä säällä tehtyjen laserkeilausten tulosten mukaan myös koivun halkaisija kasvaa paikallisesti korkeuden funktiona 3 metrin korkeudessa ja latvassa 13 metrin korkeudesta 15 metrin korkeuteen (kuva 21). Tulos on mahdollinen, mutta epätodennäköinen, koska tuulisen sään arvot käyttäytyvät eri tavalla korkeuden funktiona. Myöskään valokuva koivusta kuvassa 22 ei tue tätä tulosta. Vahva oksa saattaa haitata halkaisijan määrittämistä 4 metrin korkeudessa. Männyn tapaukseen verrattuna tilanne on erilainen, koska kahdella peräkkäisellä mittauskorkeudella (12 ja 13 m) saadaan odottamattoman pienet halkaisijat.

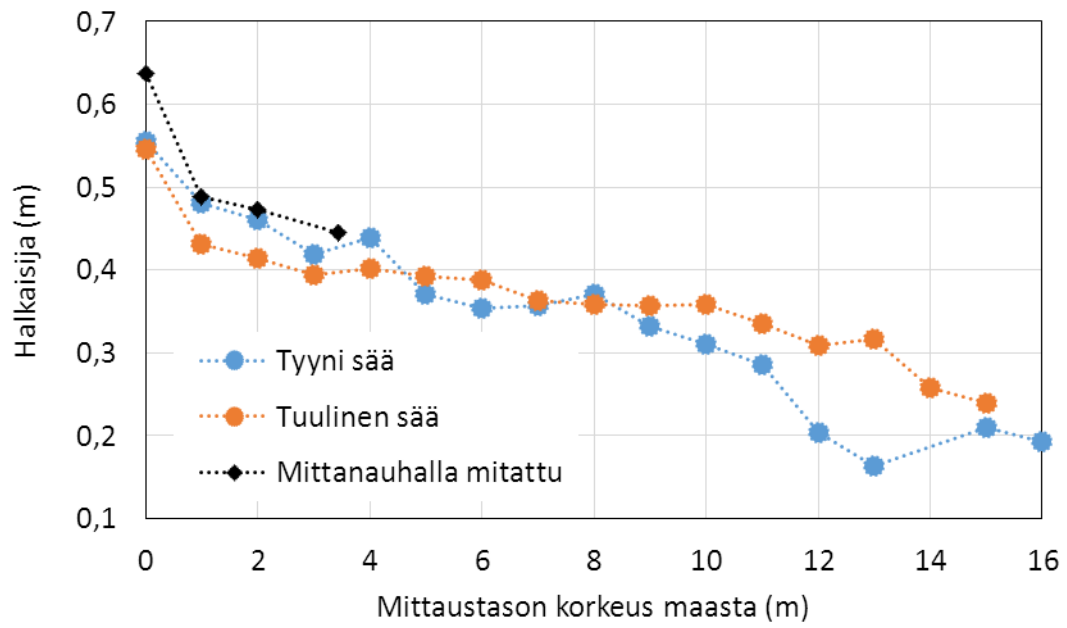
Kuvissa 20 ja 21 on esitetty myös mittanauhalla tehtyjen mittausten perusteella lasketut runkojen halkaisijat noin 3 metrin korkeuteen. Puiden halkaisijat laskettiin olettamalla niiden poikkileikkaukset ympyröiksi. Puiden kasvamisen vuoksi mittanauhamittauksen aikana puiden todelliset halkaisijat olivat suuremmat kuin laserkeilauksen tekohetkellä, mutta vain pari millimetriä talviajan pienemmän kasvun takia.

Männylle mittanauhalla saadut tulokset ovat hyvin yhtäpitäviä lasermittausten kanssa. Ainoastaan alimmalla korkeustasolla mittanauhamittaus antaa 2 cm suuremman halkaisijan kuin tyynen sään mittaussaineistosta määritetty halkaisija, mutta vain 6 mm suu-

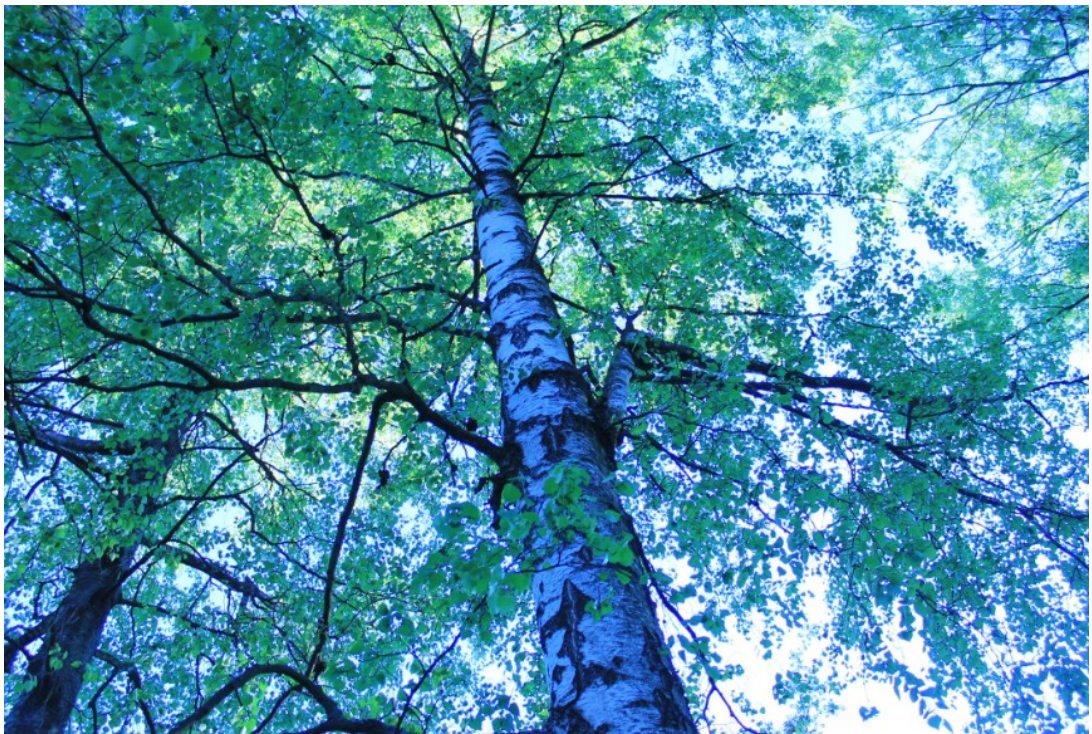
remman kuin tuulisen sään mittaustulosten yhtäpitävyyttä. Alimmalla mittaustasolla mittanauhamittaukset antoivat 8 cm suuremman halkaisijan kuin laserkeilauksella. Ylemmillä määritystasoilla mittanauhamittaukset vastasivat hyvin tyynen sään laserkeilausten tuloksia, mutta olivat noin 6 cm suuremmat kuin tuulisen sään aineistosta määritetty halkaisijat. Mittanauhamittausten suurempiin arvoihin on useita mahdollisia syitä. Alin taso saatettiin valita alemmaksi kuin laserkeilausaineistoa käsiteltäessä, ja rungon tyven muodon vuoksi pienikin korkeuspoikkeama johtaa suureen eroon halkaisijassa (vrt. kuva 26). Tyvessä koivun rungon poikkileikkaus ei ole ympyrämainen (vrt. kuva 24). Lisäksi tuohi on repeillyt ja käpertynyt varsinkin alaosassa, mutta myös ylempänä, ja mittanauha jäi käpertyneitten tuohien päälle, jolloin mittanauhalla mitattuna saatiin todellista suurempi ympärysmitta. Luonnollisesti tuohen repeily ja käpertyminen vaikuttaa myös lasermittausten tuloksiin.



Kuva 20. Maalaserkeilauksen mittaustuloksista määritetty ja mittanauhalla mitattu männyn halkaisija korkeuden funktiona.



Kuva 21. Maalaserkeilauksen mittaustuloksista määritetty ja mittanauhalla mitattu koivun halkaisija korkeuden funktiona.



Kuva 22. Mitatun koivun yläosa alapuolelta kuvattuna.



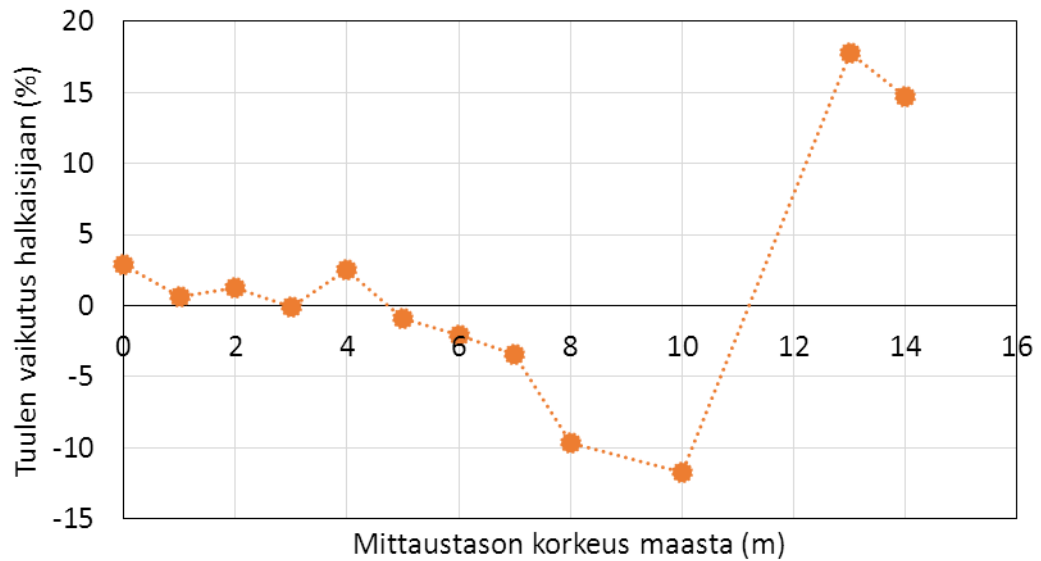
Kuva 23. Vanhan vaurion aiheuttama kolo mitatun männyn rungossa.



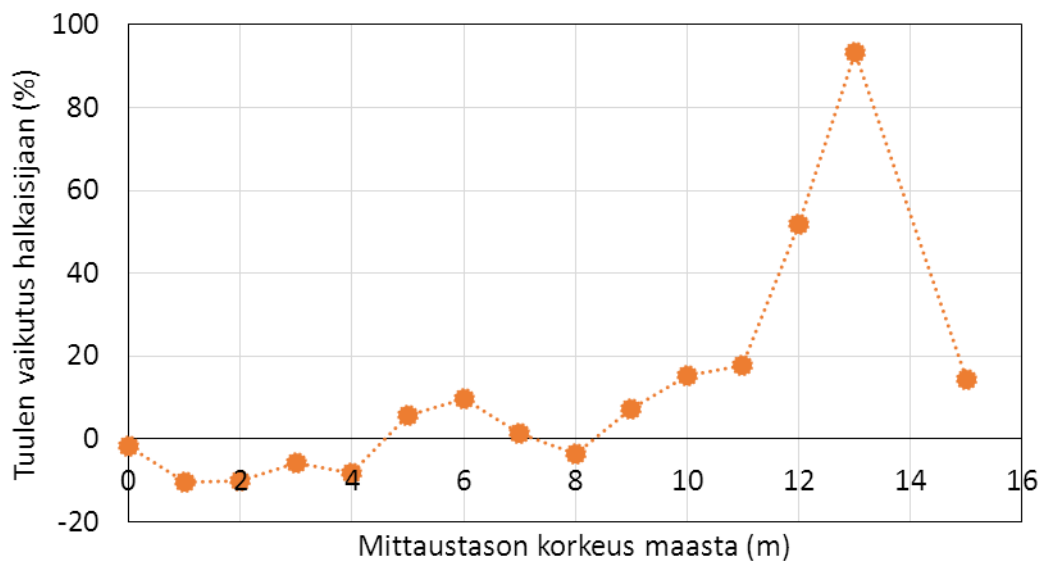
Kuva 24. Mitatun koivun rungon alaosa.

Kuvissa 25 ja 26 on esitetty tuulen suhteellinen vaikutus männyn ja koivun halkaisijaan korkeuden funktiona. Tulosten mukaan männyn latvassa yli 7 metrin korkeudessa tuulen vaikutus halkaisijaan on merkittävä. Koivun latvalle saadaan varsin merkittävä tuulen vaikutus, kun tuulisen sään aineistosta määritetty halkaisija on lähes kaksinkertainen tyynen sään aineistosta määritettyyn verrattuna. Varsin todennäköisesti kyse ei ole tuu-

len vaikutuksesta, vaan tyynellä säällä määritettyjen halkaisijoiden epärealistisen pienistä arvoista 12 ja 13 metrin korkeudessa (vrt. kuva 21).



Kuva 25. Tuulen vaikutus männyn halkaisijaan korkeuden funktiona.



Kuva 26. Tuulen vaikutus koivun halkaisijaan korkeuden funktiona.

5.1.2 Rungon tilavuus

Pääsääntöisesti noin metrin välein määritetyn rungon halkaisijan perusteella määritettiin katkaistujen kartioiden tilavuus. Puiden tilavuutta laskettaessa halkaisijoiden oletettiin muuttuvan lineaarisen määrittystasojen välillä. Mittaustasojen väliin jäävien rungon osien tilavuus laskettiin kaavasta

$$V = h(A_1 + (A_1 A_2)^{0,5} + A_2)/3 \quad (2)$$

missä h on mittaustasojen välin pituus. Rungon poikkileikkausten pinta-alat mittaustasoilla, A_1 ja A_2 , laskettiin määritetyistä halkaisijoista (vrt. kuvat 35 ja 36) soveltamalla samaa oletusta kuin halkaisijoitten määrittämisessä eli olettamalla rungon poikkileikkaukset ympyröiksi. Rungon kokonaistilavuus saatiin laskemalla katkaistujen kartioiden tilavuudet yhteen.

Kuvissa 27 ja 29 on esitetty allekkaisten mittaustasojen väliin jäävien männyn rungon osien tilavuus pituusyksikköä kohti (eli käytännössä mittaustasojen väliin jäävän rungon osan tilavuutta vastaavan sylinterin poikkipinta-ala). Tyynen sään mittauksista määritetty männyn tilavuus pituusyksikköä kohti on suurempi kuin tuulisen sään aineistosta, erityisesti yli 7 metrin korkeudessa (kuva 27). Tyynen sään mittausaineistosta on mahdollista määrittää tilavuus metriä korkeammalta kuin tuulisen sään mittausaineistosta.

Koivun tapauksessa tuulen vaikutus tilavuuteen pituusyksikköä kohti on huomattava ja epärealistisen suuri alle 4 metrin korkeudessa (kuva 28). Toisaalta yli 10 metrin korkeudessa tyynen sään mittausaineisto antaa merkittävästi pienemmät tilavuudet pituusyksikköä kohti, mikä aiheutuu tyynen sään mittauksista määritetyn halkaisijan epärealistisesta käyttäytymisestä 13–15 metrin korkeudessa (kuva 21).

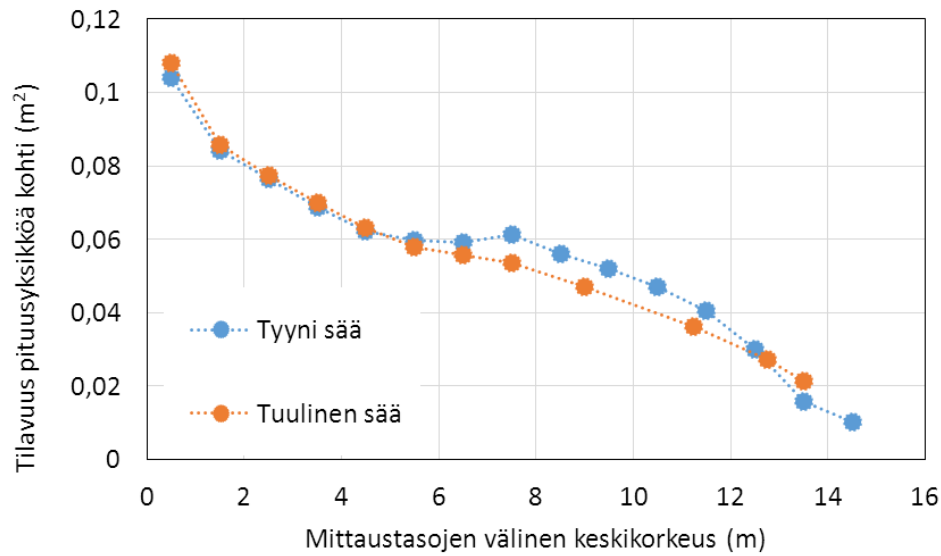
Männyn ja koivun kumulatiivinen tilavuus korkeuden funktiona on esitetty kuvissa 29 ja 30. Lisäksi tuulen suhteellinen vaikutus puiden tilavuuteen korkeuden funktiona on esitetty kuvissa 31 ja 32. Tuuli näyttäisi kasvattavan lasermittausten perusteella männyn alaosan tilavuutta (kuvat 29 ja 31), mikä ei kuitenkaan todennäköisesti ole tuulen vaikutus, koska kasvu aiheutuu alimmalle mittaustasolle määritellystä suuremmasta halkaisijasta (kuva 20). Tuulisella säällä tehtyjen laserkeilausten tuloksista saadaan koivun alaosan tilavuudelle merkittävästi pienempi tilavuus kuin tyynen sään aineistosta (kuvat 30 ja 32).

Tuuli vaikuttaa hieman enemmän koivun arvioituun kokonaistilavuuteen, joka oli tuuliselle säälle yli 5 prosenttia suurempi kuin tyynelle säälle. Toisaalta männyn määritetty kokonaistilavuus oli tuuliselle säälle 4,5 prosenttia pienempi kuin tyynelle säälle. Ero tilavuuksissa aiheutuu alaluvussa 5.1.3 mainituista mittausteknisistä epävarmuuksista. Lisäksi tuuli vaikuttaa puihin eri tavalla: tuulikuormat ovat erilaiset, puiden taipu-
misominaisuudet ovat erilaiset ja männyn juuret ulottuvat huomattavasti syvemmälle kuin koivun juuret.

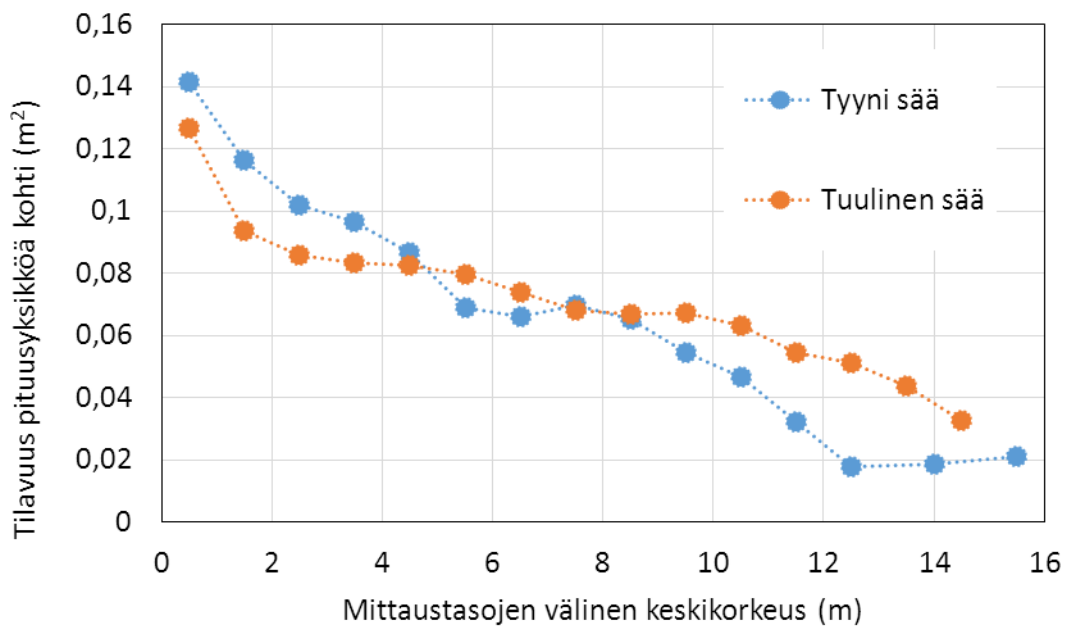
Tyyntä säätä vastaavana männyn rungon kokonaistilavuutena käytettiin koko määritettyä tilavuutta eli tilavuutta 15 metrin korkeuteen asti. Tuulisen sään mittauksia edustavana rungon tilavuutena käytettiin myös koko kyseisestä aineistosta määritettyä tilavuutta eli siis rungon tilavuutta 14 metrin korkeuteen asti. Jos tyynen sään mittauksia vastaava rungon kokonaistilavuus olisi myös otettu 14 metrin korkeuden alapuolella jäävän rungon tilavuudeksi, männyn tilavuus olisi ollut 1,2 prosenttia pienempi. Vastavasti koivun tapauksessa tyyntä säätä vastaavana rungon kokonaistilavuutena käytettiin 16 metrin korkeuteen asti määritettyä rungon tilavuutta ja tuulisen sään mittauksia edustavana rungon tilavuutena käytettiin rungon tilavuutta 15 metrin korkeuteen asti. Jos tyynen sään mittauksia vastaava koivun rungon kokonaistilavuus olisi otettu 15 metrin korkeuden alapuolella jäävän rungon tilavuudeksi, koivun kokonaistilavuus olisi ollut 2,1 prosenttia pienempi.

Vaikka koivun halkaisija korkeuden funktiona on melko erilainen tuulisella ja tuulettomalla säällä (vrt. kuva 21), kokonaistilavuudet saadaan kuitenkin hyvin samanlaisiksi,

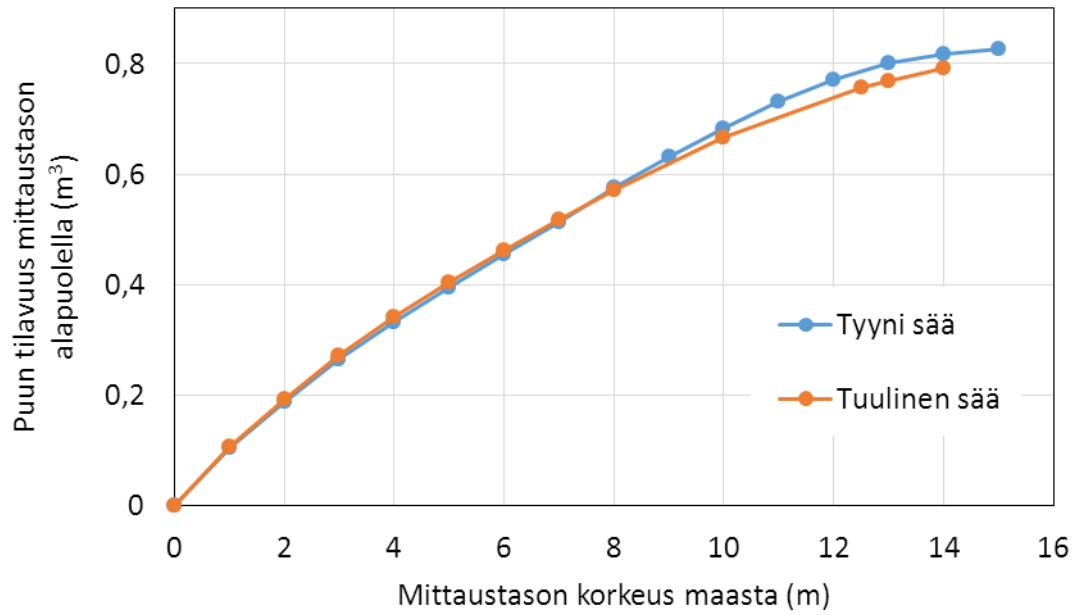
mikä saattaa olla sattumaa eri virhelähteiden kompensoidessa toisiaan. Vahvojen johtopäätösten tekeminen edellyttäisi, että mitattaisiin tilastollisesti merkittävä määrä puita. Käytännössä samakin puu pitäisi mitata useamman kerran samoissa olosuhteissa.



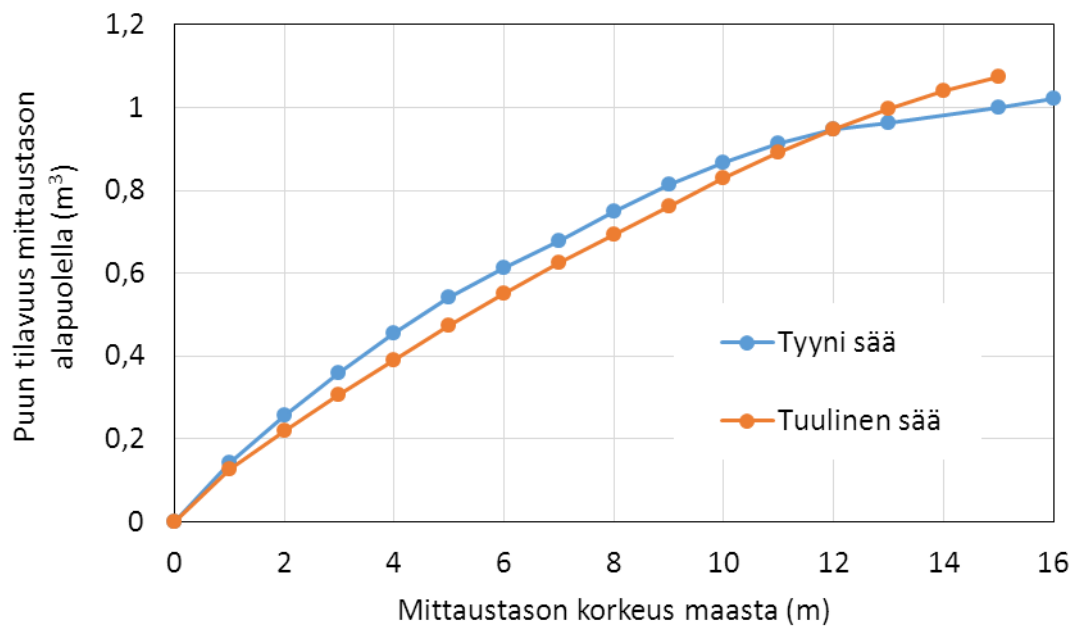
Kuva 27. Mittaustasojen väliin jäävän männyn rungon osan tilavuus pituusyksikköä kohti korkeuden funktiona.



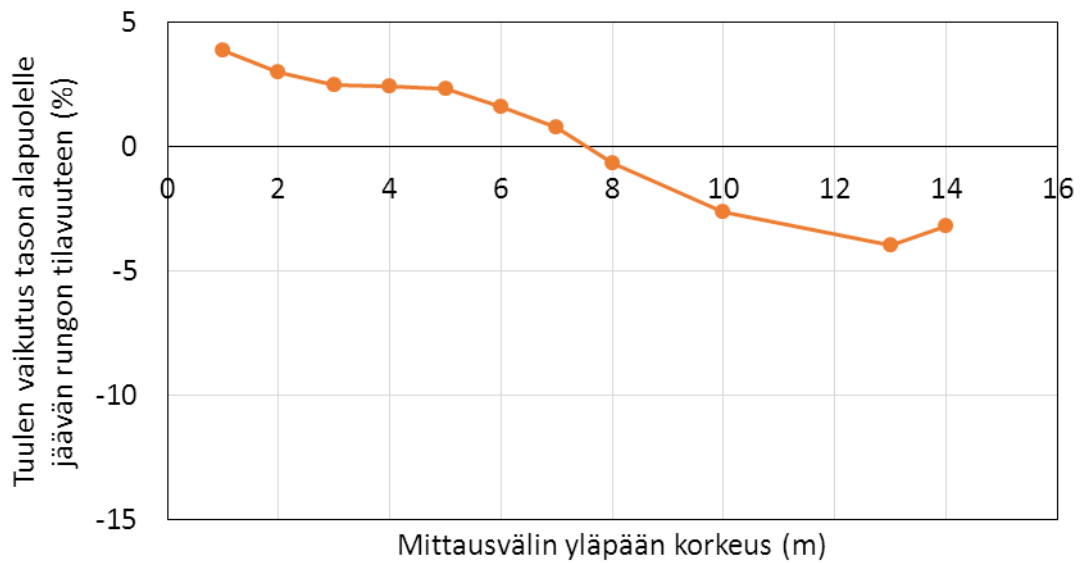
Kuva 28. Mittaustasojen väliin jäävän koivun rungon osan tilavuus pituusyksikköä kohti korkeuden funktiona.



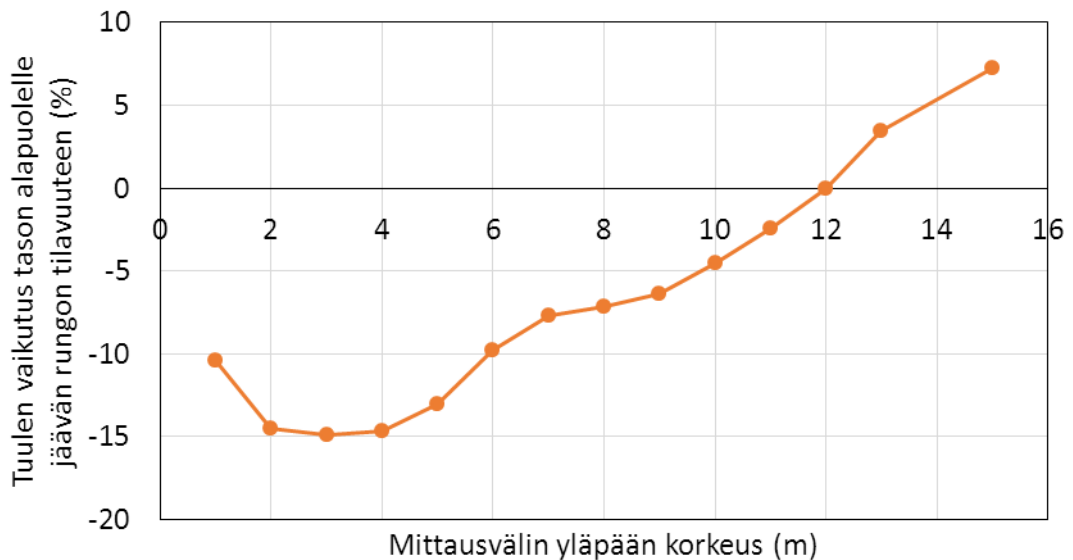
Kuva 29. Männyn tilavuus mittaustason alapuolella korkeuden funktiona.



Kuva 30. Koivun tilavuus mittaustason alapuolella korkeuden funktiona.



Kuva 31. Tuulen vaikutus mittaustason alapuolelle jäävän männyn rungon tilavuuteen korkeuden funktiona.



Kuva 32. Tuulen vaikutus mittaustason alapuolelle jäävän koivun rungon tilavuuteen korkeuden funktiona.

5.1.3 Rungon tilavuuden määrittystarkkuus

Puiden runkojen muoto määritettiin erittäin tarkasti (vrt. kuvat 18 ja 19). Käytetty mittaustapa vaikeutti kuitenkin rungon halkaisijan määrittämisestä. Kokonaisvirheen suuruutta arvioitaessa voitiin olettaa, että Faron Focus 3D 120 -laserkeilaimen etäisyysmittaustarkkuus on noin ± 2 mm.

Merkittävä mittaustarkkuuteen vaikuttanut tekijä on tuuli. Kuvissa 35 ja 36 on esitetty koivun ja männyn runkojen poikkileikkauksia eri korkeuksilta. Käytännössä puiden heilunta tuulisella säällä oli niin voimakasta, että rungon halkaisijan määrittäminen ei

aina onnistunut puun latvassa. Tarkoitus oli määrittää puiden halkaisija metrin välein, mutta huonon mittaustarkkuuden takia muutamat välit olivat suurempia.

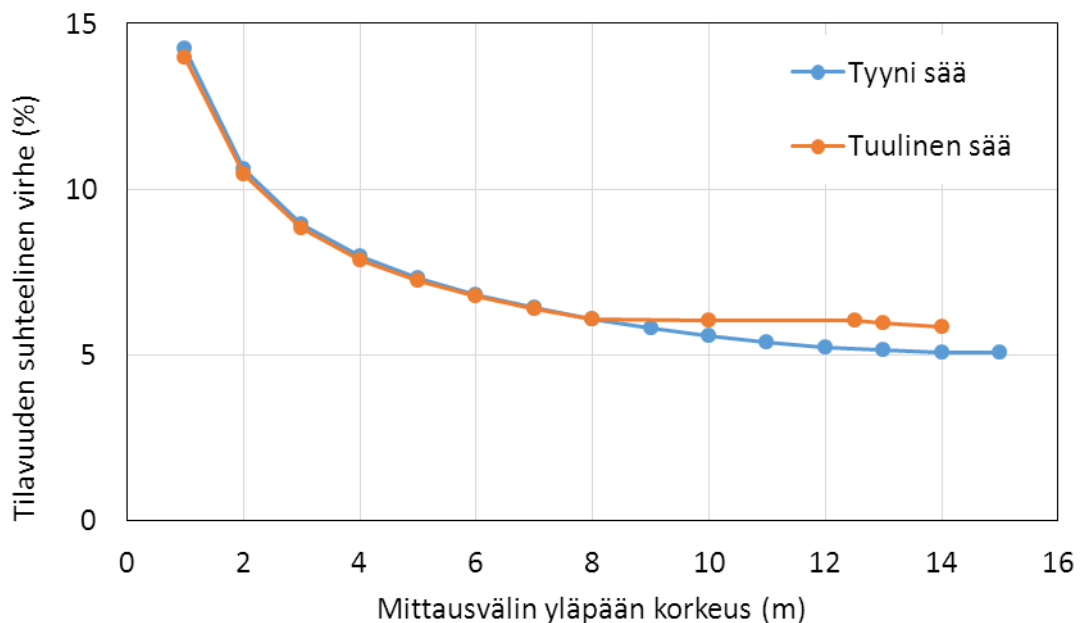
Pisteiden mitattuihin koordinaatteihin vaikuttivat myös muut puut mitattavan puun edessä sekä kaikkien puiden oksat, neulaset ja lehdet. Näiden tekijöiden vaikutus oli sitä suurempi mitä korkeammalta rungosta pisteitä mitattiin. Toisaalta keilauksen aikana, erityisesti tuulisella säällä, ilmassa mahdollisesti liikkui puista irronneita lehtiä ja neulasia, jotka myös lisäsivät kohinaa.

Kaikki rungon poikkileikkausta tietyllä korkeudella edustavat pisteet eivät aina yhdessä muodosta selkeää ympyrää, jolloin oli valittava, mistä suunnista tehdyistä mittauksista halkaisija määritetään. Jos pisteitä puuttui olennaisesti, rungon todennäköinen muoto arvioitiin silmämääräisesti. Tällöin oli mahdollista tulkita väärin rungon todellinen muoto puutteellisen aineiston perusteella. Näissä tilanteissa tehty virheet vaikuttivat männyn rungon halkaisijan määrittämiseen arvioilta enintään 2–3 cm. Koivun tapauksessa vaikutus oli todennäköisesti suurempi.

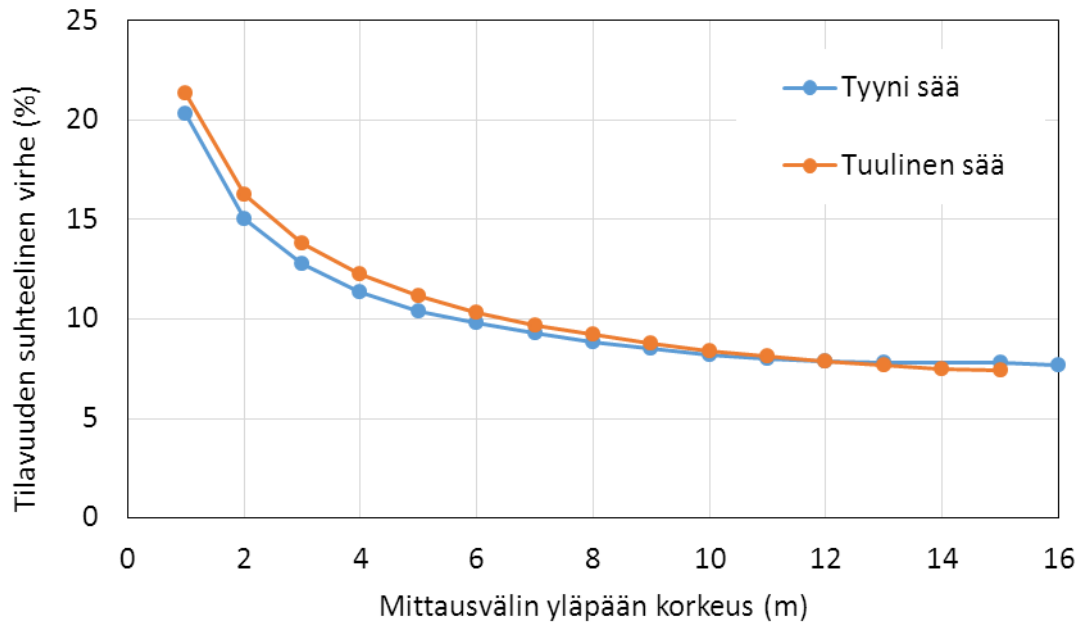
Virhettä tilavuuden määrittämisessä arvioitiin kaavalla:

$$\Delta V = (\sum_{i=1}^n (\frac{\partial V}{\partial D_i} \Delta D_i)^2)^{0,5}, \quad (3)$$

missä ΔD_i on yksittäisen halkaisijan määrittämisen epävarmuus ja V yksittäisen rungon kokonaistilavuus joko tyynellä tai tuulisella säällä. Tilavuuden suhteellinen epävarmuus korkeuden funktiona on esitetty kuvassa 33 männylle ja kuvassa 34 koivulle sekä tuulisella säällä että tyynellä säällä. Kuvien 20 ja 21 sekä 35 ja 36 perusteella arvioitiin, että männyn halkaisijan määrittämisen epävarmuus on 3 cm. Koivun halkaisijan määrittämisen epävarmuus lienee ainakin 5 cm. Koko männyn rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus on sekä tuulisen että tyynen aineistossa yli 5 prosenttia. Vastaavasti koivun rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus on yli 7 prosenttia molemmille tuuliolosuhteille.

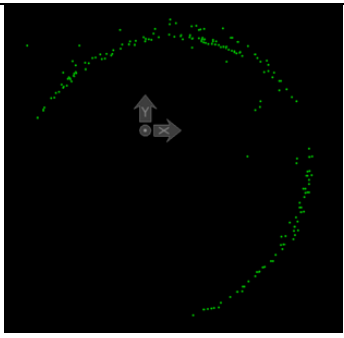
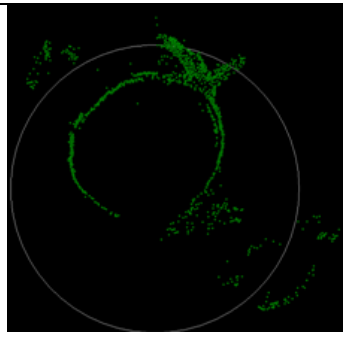
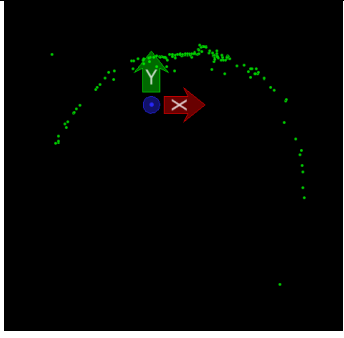
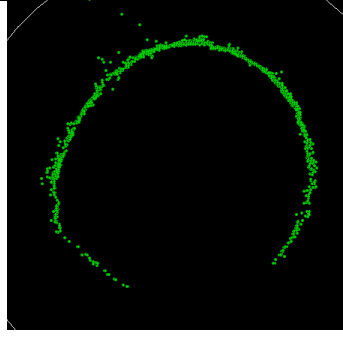
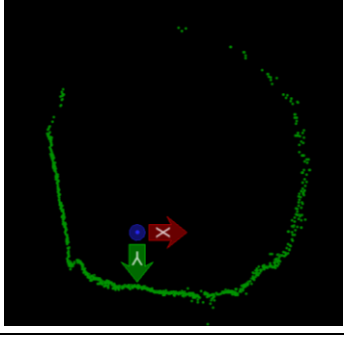
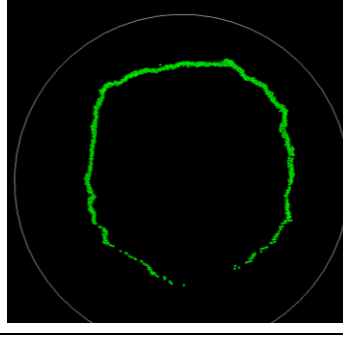


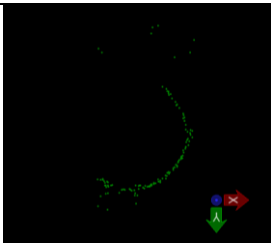
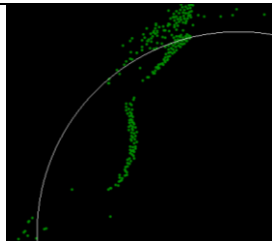
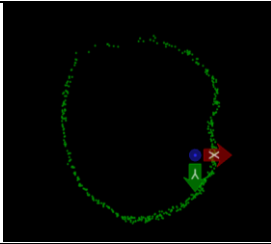
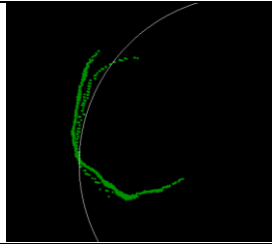
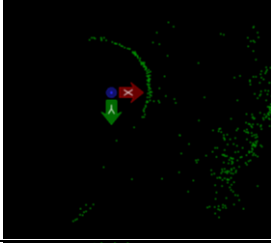
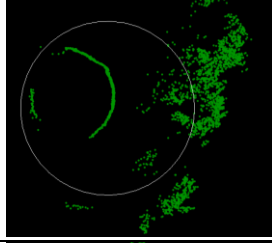
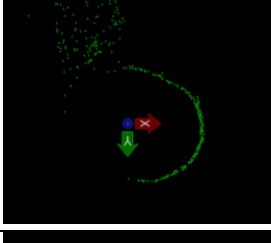
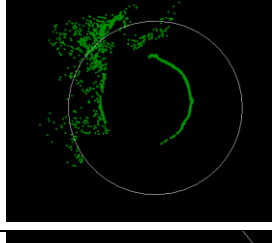
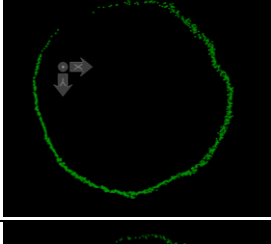
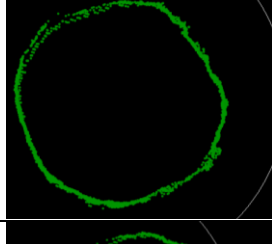


Kuva 33. Männyn rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus korkeuden funktiona, kun jokaisen halkaisijan määrittämisen epävarmuudeksi oletetaan 3 cm.



Kuva 34. Koivun rungon tilavuuden suhteellinen epävarmuus korkeuden funktiona, kun jokaisen halkaisijan määrittämisen epävarmuudeksi oletetaan 5 cm.

Männyn tilavuuden suhteellinen epävarmuus on siis suurempi kuin rungon tilavuuksien suhteellinen ero määritettynä tyynen ja tuulisen sään aineistoista (vrt. kuvat 31 ja 33). Koivun rungon kokonaistilavuuksien ero tyynen ja tuulisen sään aineistoista määritettynä on noin prosenttiyksikön suurempi kuin tilavuuden määrittämisen arvioitu epävarmuus (vrt. kuvat 32 ja 34). Kuitenkin kuvien 21 ja 35 perusteella voidaan päätellä, että koivun halkaisijan määrittämisen epävarmuus saattaa olla suurempi ja siten myös tilavuuden epävarmuus suurempi kuin tuulisen ja tyynen sään aineistoista saatujen kokonaistilavuuksien ero. Koska määritettyjen halkaisijoiden epävarmuuksista aiheutuva runkojen kokonaistilavuuksien epävarmuus on ainakin samaa suuruusluokkaa kuin tuloksena saatu tuulen vaikutus määritettyyn tilavuuteen, tuulen vaikutusta laserkeilausten aineistojen perusteella määritettyyn runkojen kokonaistilavuuteen ei tässä työssä käytävissä olleen mittausaineiston perusteella voida arvioida.

Korkeus (m)	Tyyni sää $d(\text{mm})$		Tuulinen sää $d(\text{mm})$	
10		311		359
6		354		388
2		461		415
Kuva 35. Koivun rungon poikkileikkaus ja määritetty halkaisija kolmella eri korkeudella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla tyynellä ja tuulisella säällä mitatusta aineistosta.				

Korkeus (m)	Tyyni sää $d(\text{mm})$	Tuulinen sää $d(\text{mm})$
14		
12		
10		
8		
6		
2		

Kuva 36. Männyn rungon poikkileikkaus ja määritetty halkaisija kolmella eri korkeudella visualisoituna MicroStation-ohjelmistolla tyynellä ja tuulisella säällä mitatusta aineistosta.

5.2 Kiinteistön puuston arvo

Tehtävän määrittelyn (luku 4.1) mukaisen kuvitteellisen metsäkiinteistön puuston arvo laskettiin sekä summa-arvo- että tuottoarvomenetelmällä. Molemmissa tapauksissa oletettiin, että männyn hinta on 56 €/ m³ ja koivun hinta 42 €/ m³ (Paananen ym., 2009). Hinnat valittiin puukaupassa tukkipuulle käytettyjen markkinahintojen perusteella. Kuitupuun osuutta ei otettu huomioon, koska latvan tilavuus ei vaikuta merkittävästi yksittäisen puun arvoon.

Kuvitteellisen metsäkiinteistön puuston arvo laskettuna summa-arvomenetelmällä sekä tyynellä että tuulisella säällä tehtyjen laserkeilausten mittaustuloksista määritetyn koivun ja männyn tilavuuden perusteella on esitetty taulukossa 2. Ensin laskettiin yhden koivun ja männyn arvo kertomalla rungon tilavuus kuutiometrin hinnalla. Kaikkien mäntyjen arvo laskettiin kertomalla puiden lukumäärä yhden männyn arvolla. Samalla tavalla laskettiin koivujen arvo. Koko puuston arvo saatiin laskemalla mäntyjen ja koivujen arvot yhteen.

Taulukko 2. Kuvitteellisen metsäkiinteistön puuston arvo summa-arvomenetelmällä sekä tyynellä että tuulisella säällä tehtyjen mittausten perusteella.

	Tyyni sää	Tuulinen sää	Tuulen vaikutus	
			Erotus	Muutos (%)
Koko puuston arvo (€)	18100	17800	-300	-1,66
Mäntyjen arvo (€)	12960	12410	-550	-4,24
Koivujen arvo (€)	5150	5410	260	5,04
Yhden männyn arvo (€)	46,3	44,3	-2,0	-4,24
Yhden koivun arvo (€)	42,9	45,1	2,2	5,04

Ero puuston kokonaisarvossa tyynellä ja tuulisella säällä on yllättävän pieni. Mäntyjen ja koivujen arvoon tuuli vaikutti selvästi. Esimerkiksi jokaisesta tuulisella säällä keilattusta koivusta puiden ostaja maksaa 2,2 euroa enemmän kuin tyynellä säällä mitatusta koivusta. Männyllä tuulen vaikutus on eri merkinen, jolloin kokonaisvaikutus pienenee.

Kun arviointimenetelmäksi vaihdetaan tuottoarvomenetelmä, puuston arvo lasketaan kuvassa 11 esitettyä kaaviota soveltaen. Tuottoarvomenetelmää sovellettaessa tuulen euromääräinen vaikutus puuston kokonaisarvoon on suurempi kuin summa-arvomenetelmällä laskettaessa. Taulukoissa 3–5 on esitetty mäntyjen ja koivujen sekä koko puuston kokonaisarvo, kun arviointi tehtiin tuottoarvomenetelmällä. Koron vaihteluväliksi on valittu 4–8 prosenttia, joka on sijoittajan todennäköinen tuottovaatimus tällaisesta sijoituskohteesta nykyisessä matalakorkoisessa taloustilanteessa.

Tuottoarvomenetelmän perusteella esimerkiksi mäntyjen kokonaisarvo on tuulisella säällä keilattaessa 690–830 euroa (4,4 %) pienempi kuin tyynellä säällä mitatuista tuloksista laskettuna (taulukko 4). Koivujen arvo on 320–380 euroa suurempi tuulisella

säällä kuin tyynellä säällä. Myös tuotto-arvomenetelmässä tuulen vaikutus koivujen arvoon on eri merkinen kuin mäntyjen arvoon, joten tuulen vaikutukset kompensoivat toisiaan ja tuulen vaikutus kaikkien puiden arvoon pienenee merkittävästi.

Taulukko 3. Koivujen kokonaisarvo tyynellä ja tuulisella säällä, kun arviointimenetelmä on tuottoarvomenetelmä.

Korko (%)	Tuottoarvo (€), tyyni	Tuottoarvo (€), tuulinen	Erotus	Muutos (%)
4	6270	6590	320	5,10
5	6580	6910	330	5,02
6	6890	7240	350	5,08
7	7230	7600	370	5,12
8	7570	7950	380	5,02

Taulukko 4. Mäntyjen kokonaisarvo tyynellä ja tuulisella säällä, kun arviointimenetelmä on tuottoarvomenetelmä.

Korko (%)	Tuottoarvo (€), tyyni	Tuottoarvo (€), tuulinen	Erotus (€)	Muutos (%)
4	15780	15090	-690	-4,4
5	16550	15830	-720	-4,4
6	17360	16600	-760	-4,4
7	18190	17390	-800	-4,4
8	19060	18230	-830	-4,4

Taulukko 5. Puuston kokonaisarvo tyynellä ja tuulisella säällä, kun arviointimenetelmä on tuottoarvomenetelmä.

Korko (%)	Tuottoarvo (€), tyyni	Tuottoarvo (€), tuulinen	Erotus (€)	Muutos (%)
4	22050	21680	-370	-1,7
5	23130	22740	-390	-1,7
6	24250	23840	-410	-1,7
7	25420	24990	-430	-1,7
8	26630	26180	-450	-1,7

5.3 Vaikutukset metsän arvoon

Mittausprosessin vaikutus metsän kokonaisarvoon on erilainen sekä summa-arvo- että tuottoarvomenetelmässä. Molemmissa arviointimenetelmissä tuulen vaikutuksesta esimerkiksi kiinteistön puuston arvo joko laskee tai nousee satoja euroja. Tuottoarvomenetelmässä arviointiin vaikuttaa myös laskentakorkokanta, minkä vuoksi arvonnousu on euromääräisesti suurempi kuin summa-arvomenetelmässä.

Tutkimusasetelmassa esimerkikiinteistö määriteltiin kahden puulajin sekapuumetsäksi. Koska tuulen vaikutus koivun ja männyn arvoihin oli päinvastainen, tuulen vaikutus kaikkien puiden yhteisarvoon jäi verrattain pieneksi. Jos arvioitavalla kiinteistöllä olisi ollut 2 000 koivua, puuston kokonaisarvo olisi noussut tuulen vaikutuksesta lähes 10 000 euroa. Mäntytilalla tuulen vaikutus olisi arvoa laskeva, mutta noin puolet pienempi kuin vastaavien koivutilojen arvonnousu.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli selvittää maalaserkeilauksen sovellettavuutta ja luotettavuutta puuston arvonmäärityksessä demonstraation avulla. Aikaisemmissa tutkimuksissa oli tutkittu ilmalaserkeilauksen soveltamista puuston tilavuuden määrittämisessä (Holmgren, 2003). Tekniikan kehittyessä laserkeilaus on käytännössä korvannut kokonaan relaskooppimenetelmän (Paananen ym., 2009). Laserkeilauksen soveltamista puuston arvonmäärityksessä on selvitetty aikaisemmin esimerkiksi Holopaisen ja Viitasen (2011) tutkimuksessa.

Metsän arviointimenetelmistä tärkeimpiä ovat summa-arvo-, tuottoarvo- ja kauppavarmen menetelmä. Summa-arvomenetelmässä maapohjan ja puuston arvo lasketaan yhteen. Tuottoarvomenetelmässä arvo lasketaan metsästä tulevaisuudessa saatavien tuottojen perusteella. Metsän tuottoarvo on tulevaisuudessa toteutuvien tulojen ja menojen nykyarvojen välinen erotus, joka on myös nettotulojen nykyarvo. Kauppavarmen menetelmässä arvo määritetään arviointikohdetta vastaavien vertailukelpoisten kauppojen hintatutkimuksen perusteella. Arviointimenetelmistä summa-arvo- ja tuottoarvomenetelmä ovat yleisesti käytössä, kun taas kauppavarmen menetelmää käytetään metsänarvioinnissa harvemmin.

Työssä käytettiin kahden tukevan, tyvihalkaisijaltaan noin puolen metrin puun, männyn ja koivun, maalaserkeilauksien aineistoja. Laserkeilaukset oli tehty tyynellä ja tuulisella säällä, ja tutkimuksessa pyrittiin selvittämään myös tuulen vaikutus arvonmääritykseen. Metsän arvonmäärityksessä tarkastellussa kuvitteellisessa metsässä oletettiin olevan vain mitatun kaltaisia koivuja (30 %) ja mäntyjä (70 %).

Laserkeilaustulosten aineiston perusteella määritettiin puiden runkojen halkaisijat pääsääntöisesti metrin välein. Mittaustuloksiin ja niiden perusteella määritettyihin rungon halkaisijoihin sisältyy useita erilaisia virhelähteitä. Esimerkiksi männyn tyven halkaisijalle saatiin noin 1,4 cm:n (2,9 prosenttia) ero tuulisella ja tyynellä säällä mitattujen tulosten välillä. Tuuli ei suoraan aiheuttane tätä eroa, mitä päätelmää tukee sekin, että ylempää aina kolmeen metriin asti määritetyissä männyn halkaisijoissa tuulen vaikutus on mittausten mukaan huomattavasti pienempi. Kyse lienee menetelmään sisältyvästä virhelähteestä, jonka vaikutus halkaisijan määrityksen toistettavuuteen olisi syytä selvittää.

Mittanauhalla mitattu koivun halkaisija oli keskimäärin lähes 8 cm (15 prosenttia) suurempi kuin tuulisen sään maalaserkeilausaineistosta määritetty halkaisija alle neljän metrin korkeudessa. Toisaalta verrattaessa tyynen sään mittausaineistosta määritettyyn halkaisijaan mittanauhamittauksen tulos poikkesi metrin korkeudessa ja ylempänä vain 1–2,5 cm (2–5 prosenttia). Koivun rungon alaosan ympyrästä poikkeava muoto (kuva 26) vaikutti myös halkaisijan määrittämiseen. Männyn halkaisijan määrittämisessä alaosasta noin kolmen metrin korkeuteen asti mittausprosessilla ei ollut käytännön merkitystä.

Puun rungon tilavuus tyvestä muutama metri ylöspäin voidaan selvittää varsin luotettavasti laserkeilausaineistosta, mutta latvaosan tilavuus on parempi määrittää esimerkiksi rungon yleisen mallin perusteella. Työssä käytetyn aineiston perusteella ei voida esittää mallia korkeudelle, johon saakka rungon tilavuus saataisiin luotettavasti maalaserkeilauksen tuloksista. Tutkimuksessa analysoitujen isojen puiden tapauksessa rungon muodon selvittäminen vaikeutui korkeuden kasvaessa. Ilmeisesti korkeuteen, jonka alapuo-

lella rungon tilavuus voitaisiin määrittää luotettavasti maalariskeilauksen tuloksista, vaikuttaa ainakin puulaji, rungon halkaisija ja sen muuttuminen korkeuden funktiona, maaperä ja sen mahdollinen jäätyminen sekä sääolosuhteet ja erityisesti tuulisuus mittaushetkellä.

Tutkittujen puiden rungon tilavuuden määrittäminen maalariskeilauksen avulla onnistui pääsääntöisesti luotettavasti kahdeksan metrin korkeuteen asti, joka on yli 50 prosenttia puun korkeudesta. Ylempänä keilauksesta saatava pistepilvi menee odotetusti epäselväksi, ja rungon halkaisijan määrittäminen vaikeutuu, jolloin tulos sisältää merkittäviä epävarmuuksia. Tuulisella säällä männyn kokonaistilavuus saatiin yli 3 prosenttia pienemmäksi kuin tyynellä säällä. Toisaalta tuulisen sään mittausaineistosta määritetty koivun kokonaistilavuus oli 5 prosenttia suurempi kuin tyynen sään aineistosta saatava tilavuus. Varsinkin männyn tuloksissa tilavuuksille saatava ero ei aiheutunut tuulen vaikutuksesta, vaan epävarmuuksista halkaisijan määrittämisessä erityisesti latvaosassa.

Tuulen vaikutus puuston arvoon on ennako-odotuksia pienempi. Puuston arvonmäärittäykseen käytettiin tässä työssä laskettuja puiden tilavuuksia ja tukkipuun hintatietoa. Kuvitteellisen esimerkkikiinteistön puuston kokonaisarvon ero tuulisella ja tyynellä säällä on vain 1,7 prosenttia. Toisaalta tuottoarvomenetelmää sovellettaessa puuston kokonaisarvo oli selvästi suurempi (4–8 %) kuin summa-arvomenetelmällä saatu arvo. Tähän vaikutti valittu laskentakorkokanta. Lisäksi molempia arviointimenetelmiä sovellettaessa mäntyjen kokonaisarvo oli pienempi tuulisella säällä kuin tyynellä säällä tehtyjen mittausten aineistosta, mutta koivujen kokonaisarvo oli päinvastoin suurempi tuulisella säällä kuin tyynellä säällä mitatuissa aineistoissa. Työn tulosten perusteella voidaan päätellä, että tuulisella säällä tehtyjen mittausten perusteella tehtävän puuston arvonmäärittäyksen virheet ovat pienemmät, jos puun ylä- ja alaosan tilavuus lasketaan eri tavoilla.

Mittausvaiheeseen liittyy muutamia merkittäviä epävarmuustekijöitä. Näitä ovat keilauskulma, resoluutio ja keilaussuunnat. Keilauskulman, resoluution ja keilaussuuntien valinta vaikuttaa suoraan pistepilviaineiston tarkkuuteen sekä mittausaikaan. Mikäli tarkoituksena on mitata puut erittäin tarkasti, valitaan suuri resoluutio, mutta yksittäinen keilaus kestää yleensä tällaisessa tilanteessa kymmeniä minutteja. Toisaalta jos resoluutio ei ole riittävä, runkojen yksityiskohtia ei nähdä.

Sen sijaan keilauskulma ja -suunnat vaikuttavat siihen, kuinka hyvin pistepilvi kattaa puun rungon. Keilauspaikkojen pitäisi olla mitattavan puun ympärillä tasaisesti, jotta koko rungosta olisi mahdollista tehdä kattava 3D-malli. Tähän vaikuttavat myös muiden puiden määrä ja sijainti sekä keilattavan puun välittömässä läheisyydessä että keilauspaikan edessä. Lisäksi kohinaa mittausaineistossa aiheuttavat esimerkiksi tippuvat lehdet ja neulaset.

Puiden tilavuutta laskettaessa valitaan aluksi suunta, josta 3D-mallin halkaisija mitataan. Valinta ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, koska puun rungon läpileikkauksen muoto ei ole koskaan täydellinen ympyrä. Tällöin joko 3D-mallin läpileikkaukseen sovitetaan ympyrä tai lasketaan muutamasta suunnasta mitattujen halkaisijoiden keskiarvo. Molemmissa menetelmissä tulokseen sisältyy aina epävarmuutta.

Koska määritettyjen halkaisijoiden epävarmuuksista aiheutuva runkojen kokonaistilavuuksien epävarmuus on varsin todennäköisesti suurempi kuin tuloksena saatu tuulen vaikutus määritettyyn tilavuuteen, tuulen vaikutusta laserkeilausten aineistojen perustel-

la määritettyyn runkojen kokonaistilavuuteen ei tässä työssä käytettävissä olleen mittausaineiston perusteella voida arvioida.

Odottamatonta oli se, että tyynellä säällä mitatuista aineistoista saatiin enemmän epäilyttäviä tuloksia. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida päätellä, onko kysymys satumasta.

Johtopäätöksissä on otettava huomioon työn luonne ja vain kahden puun otanta. Maalaserkeilaustulosten tarkkuutta tai tuulen vaikutusta ei käytetyn kahden puun perusteella voi arvioida. Tarvittaisiin kymmenien saman lajin puiden mittaukset eri sääolosuhteissa.

Tulosten tarkkuuden ja luotettavuuden kannalta tutkimuksen mittaustapa ei ole optimaalinen. Jos tavoitteena olisi saada mahdollisimman tarkkaa tietoa puuston tilavuudesta, keilaimia ja tähyksiä tarvittaisiin molempia huomattavasti enemmän. Tällöin keilaimet ja tähykset sijoitettaisiin tasaisesti mitattavien puiden ympärille kohdealueen muodon mukaan. Tämä nostaisi tietenkin kustannuksia. Toinen vaihtoehto on mitata yhdellä keilaimella kaikki puut, mutta tässä tapauksessa mittaukset veisivät runsaasti aikaa ja siten nostaisi kustannuksia. Käytännössä olisi selvitettävä, ovatko kustannukset suuremmat kuin tarkasta mittaustavasta saatavat hyödyt eli olisi tehtävä kustannus-hyöty analyysi.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin selvittää rungon halkaisijan määrittämisessä käytetyn menetelmän toistettavuus. Lisäksi voitaisiin tutkia tarkemmin, miten resoluutio, vesisade, lumisade, erimuotoiset ja -kokoiset puut, puiden määrä ja sijainti sekä rungon keskilinjän heilahtelu vaikuttavat puiden tilavuuden määrittämiseen maalaserkeilauksella. Tutkimusaiheena voisivat olla myös kuusen tilavuuden määrittäminen maalaserkeilauksella ja metsätyypin vaikutus puiden maalaserkeilauksen tulosten luotettavuuteen. Jos laserkeilausta sovelletaan tulevaisuudessa puuston arvioinnissa, kannattanee selvittää, parantaisiko pienlennokkien käyttö puuston arvonmäärityksen luotettavuutta ja tuottavuutta.

Lähdeluettelo

Airaksinen, M., 2008. Summa-arvomenetelmä metsän markkina-arvon määrittämisessä. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, maanmittausosasto. Espoo. 138 s.

Airaksinen, M., Honkanen, M., Lääti, M., Tammi, J., & Sirkiä, O. 2009. Tuottoarvomenetelmän käyttö arviointi- ja tilusjärjestelytoimitusten metsänarvioinnissa. [Verkkojulkaisu]. Maanmittauslaitoksen julkaisuja nro 110. Helsinki, Suomi: Maanmittauslaitos, kehittämiskeskus. 45 s. [Viitattu 24.11.2016]. Saatavissa: http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/Nro_110__tuottoarvomenetelman_kaytto_arviointi_ja_tilusjarjestelytoimitusten_metsanarvioinnissa.pdf.

Airaksinen, M., Hannelius, S., Honkanen, M., Lääti, M., & Väänänen, J., 2011. Metsän hinta Suomessa v. 2006 – 2007. Maanmittauslaitoksen julkaisuja nro 111. Helsinki, Suomi: Maanmittauslaitos, kehittämiskeskus. 35 s. ISBN 978-951-48-0224-9.

Alho, P., Kukko, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Jaakkola, A., 2009. Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms*. [Verkkolehti]. Vol. 34:13. S. 1831–1838. [Viitattu 2.7.2017]. DOI: 10.1002/esp.1879. ISSN: 1096–9837.

Barrile, V., Nunnari, A., & Ponterio, R., 2016. Laser scanner for architectural and cultural heritage and applications for the dissemination of the 3D model. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. [Verkkolehti]. Vol. 223. S. 555–560. [Viitattu 27.4.2017]. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.342. ISSN: 1877–0428.

Béland, M., Wildowski, J-L., Fournier, R.A., Côté, J-F., & Verstraete, M., 2011. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LIDAR measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. [Verkkolehti]. Vol. 151:9. S. 1252–1266. [Viitattu 17.5.2017]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.05.004. ISSN: 0168–1923.

Bayer, D., Selfert, S., & Pretzsch, H., 2013. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees*. [Verkkolehti]. Vol. 27:4. [Viitattu 17.5.2017] S. 1035–1047. DOI: 10.1007/s00468-013-0854-4. ISSN: 1432–2285.

Bu, G., & Wang, P., 2016. Adaptive circle-ellipse fitting method for estimating tree diameter based on single terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*. [Verkkolehti]. Vol. 10:2. [Viitattu 24.5.2017]. DOI:10.1117/1.JRS.10.026040. ISSN 1931–3195.

Calders, K., Burt, A., Origo, N., Disney, M., Nightingale, J., Raunonen, P., & Lewis, P., 2016. Large area virtual forests from terrestrial laser scanning data. Teoksessa: Zhang, L ym. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China. 10-15.7.2016. Beijing, China: The Institute of Electrical and Electronics Engineers. S. 1765–1767. ISBN 978-1-5090-3332-4.

Calders, K., Disney, M., Armston, J., Burt, A., Brede, B., Origo, N., Muir, J., & Nightingale, J., 2017. Evaluation of the range accuracy and the radiometric calibration of multiple terrestrial laser scanning instruments for data interoperability. *IEEE Transac-*

tions on Geoscience and Remote Sensing. [Verkkolehti]. Vol. 55:5. S. 2716–2724. [Viitattu 24.5.2017]. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2652721. ISSN: 0196–2892.

Cifuentes, R., Van der Zande, D., Farifteh, J., Salas, C., & Coppin, P., 2014. Effects of voxel size and smapling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*. [Verkkolehti]. Vol. 194. S. 230–240. [Viitattu 17.5.2017]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.04.013. ISSN: 0168–1923.

Forsman, M., Holmgren, J., & Olofsson, K., 2016. Tree Stem Diameter Estimation from Mobile Laser Scanning Using Line-Wise Intensity-Based Clustering. *Forests*. [Verkkolehti]. Vol. 7:9. S. 1–22. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/f7090206. ISSN 1999–4907.

Holmgren, J., 2003. Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning. Väitöskirja. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management and Geomatics. Uumaja. 41 s.

Holopainen, M., & Viitanen, K., 2011. Laserkeilaus metsäomaisuuden taloudellisen arvonmäärittämisen apuvälineenä. *The Photogrammetric Journal of Finland*. Vol. 22. No. 3. S. 176–192. ISSN 0554–1069.

Jaboydeoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M-H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*. [Verkkolehti]. Vol. 61. S. 5–28. [Viitattu 16.4.2015]. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.9695&rep=rep1&type=pdf>. ISSN 0921–030X (painettu) ISSN 1573–0840 (sähköinen).

Jones, T., Marzen, L., & Chappelka, A., 2016. Mapping, Modeling, and Estimating Tree Measurments of Urban Tree Canopy Structure Using Terrestrial LiDAR scanning. *Papers in Applied Geography*. [Verkkolehti]. Vol. 2:2. S. 236–242. [Viitattu: 24.11.2016]. DOI:10.1080/23754931.2015.1114512. ISSN 2375–494X (sähköinen).

Kankare, V., Puttonen, E., Holopainen, M., & Hyypä, J., 2016. The effect of TLS point cloud sampling on tree detection and diameter measurement accuracy. *Remote Sensing Letters*. [Verkkolehti]. Vol. 7:5. S. 495–502. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.1080/2150704X.2016.1157639. ISSN 2150–7058 (sähköinen).

Kong, F., Yan, W., Zheng, G., Yin, H., Cavan, G., Zhan, W., Zhang, N., & Cheng, L., 2016. Retrieval of three dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyse the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 217. S. 22–34. ISSN 0168–1923.

Krooks, A. Laserkeilaus puun rakenteen mallinnuksessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos. 2012. 55 s.

Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., & Vastaranta, M., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 115. S. 63–77. ISSN 0924–2716.

- Lin, Y., & Herold, M., 2016. Tree species classification based on explicit tree structure feature parameters derived from static terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*. [Verkkolehti]. Vol. 216. S. 105–114. [Viitattu 24.5.2017]. ISSN 0168–1923.
- Olagoke, M., Proisy, C., Féret, J-P., Blanchard, E., Fromard, F., Mehlig, U., De Menezes, M., Dos Santos, V., & Berger, U., 2016. Extended biomass allometric equations for large mangrove tree from terrestrial LiDAR data. *Trees*. [Verkkolehti]. Vol. 30:3. S. 935–947. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.1007/s00468-015-1334-9. ISSN 1432–2285 (sähköinen).
- Olofsson, K., Holmgren, J., & Olsson, H., 2014. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. *Remote Sensing*. [Verkkolehti]. Vol. 6:5. S. 4324–4344. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/rs6054323. ISSN 2072–4292.
- Olofsson, K., & Holmgren, J., 2016. Single Tree Stem Profile Using Terrestrial Laser Scanning Data, Flatness Saliency Features and Curvature Properties. *Forests*. [Verkkolehti]. Vol. 7:9. S. 1–23. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/f7090207. ISSN 1999–4907.
- Olschofsky, K., Mules, V., & Köhl, M., 2016. Operational assessment of aboveground tree volume and biomass by terrestrial laser scanning. *Computers and Electronics in Agriculture*. [Verkkolehti] Vol. 127. S. 699–707. [Viitattu 24.5.2017]. DOI:10.1016/j.compag.2016.07.030. ISSN 0168–1699.
- Paananen, R., Uotila, E., Liljeroos, H., & Tiili, T., 2009. *Metsän arvo: arvon määrittäminen, kannattavuus, sijoitus, verotus, metsätilan kauppa*. Painos. Helsinki, Suomi: Metsäkustannus. 360 s. ISBN 978-952-5694-25-3.
- Reshetyuk, Y., 2009. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Väitöstyö. Royal Institute of technology (KTH), Department of Transport and Economics. Stockholm. 158 s.
- Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., Liang, X., Kaartinen, H., & Kukko, A., 2017. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 123. S. 140–158. ISSN 0924–2716.
- Seidel, D., Ehbrecht, M., & Puettmann, K., 2016. Assessing different components of three-dimensional forest structure with single-scan terrestrial laser scanning: A case study. *Forest Ecology and Management*. [Verkkolehti] Vol. 381. S. 196–208. [Viitattu: 24.5.2017]. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.09.036, ISSN 0378–1127.
- Shettels, M., Hilker, T., & Temesgen, H., 2016. Examination on uncertainty in per unit area estimates of aboveground biomass using terrestrial LiDAR and ground data. *Canadian Journal of Forest Research*. [Verkkolehti]. Vol. 46:5. S. 706–715. [Viitattu 24.11.2016]. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0265. ISSN 1208–6037 (sähköinen).
- Sun, Y., Liang, X., Liang, Z., Welham, C., & Li, W., 2016. Deriving Merchantable Volume in Poplar through a Localized Tapering Function from Non-Destructive Ter-

restrial Laser Scanning. Forests. [Verkkolehti]. Vol. 7:4. S. 1–11. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/f7040087. ISSN 1999–4907.

Vaaja, M., Liikkuva laserkeilaus jokisärkkien ja penkereiden kartoituksessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Maanmittaustieteiden laitos. Espoo. 2010. 50 s.

Vaaja, M., Virtanen, J-P., Kurkela, M., Lehtola, V., Hyyppä, J., & Hyyppä, H., 2016. The effect of wind on tree stem parameter estimation using terrestrial laser scanning. Teoksessa: Halounova, L ym. XXIII ISPRS Congress, Comission VIII. Prague, Czech Republic. 12-19.7.2016. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. III-8. S. 117–122. ISSN 2194–9050 (sähköinen). (DOI:10.5194/isprsannals-III-8-117-2016).

Van Genechten, B. 2008. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications. PAINOS. 4. Valencia, Valencia, Spain: Universidad Politecnica de Valencia Editorial. 241 s. ISBN 978-84-8363-312-0.

Van Leewuen, M., Coops, N.C., Hilker, T., Wulder, M.A., Newnham, G.J., & Culvenor, D.S., 2013. Automated reconstruction of tree and canopy structure for modeling the internal canopy radiation regime. Remote Sensing of Environment. [Verkkolehti]. Vol. 136. S. 286–300. [Viitattu 17.5.2017]. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.019. ISSN: 0034–4257.

Wei, T., Lin, Y., & Zhang, L., 2016. Tree species classification based on stem-related feature parameters derived from static terrestrial laser scanning data. International Journal of Remote Sensing. [Verkkolehti]. Vol. 37:18. S. 4420–4440. [Viitattu: 24.11.2016]. DOI: 10.1080/01431161.2016.1213920. ISSN 1366–5901 (sähköinen).

Xi, Z., Hopkinson, C., & Chasmer, L., 2016. Automating Plot-Level Stem Analysis from Terrestrial Laser Scanning. Forests. [Verkkolehti]. Vol. 7:11. 1–20. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/f7110251. ISSN 1999–4907.

Yan, B., Dai, W., Dong, Z., & Liu, Y., 2016. Automatic Forest Mapping at Individual Tree Levels from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds with a Hierarchical Minimum Cut Method. Remote Sensing. [Verkkolehti]. Vol. 8:3. S. 1–18. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/rs8050372. ISSN 2072–4292.

You, L., Tan, S., Song, X., Lei, Y., Zang, H., Lou, M., & Zhuang, C., 2016. Precise Measurement of Stem Diameter by Simulating the Path of Diameter Tape from Terrestrial Laser Scanning Data. Remote Sensing. [Verkkolehti]. Vol. 8:9. S. 1–18. [Viitattu 24.11.2016]. DOI:10.3390/rs8090717. ISSN 2072–4292.

Zhang, W., Chen, Y., Wang, H., Chen, M., Wang, X., & Yan, G., 2016. Efficient registration of terrestrial LiDAR scans using a coarse-to-fine strategy for forestry applications. Agricultural and Forest Meteorology. [Verkkolehti]. Vol. 225. S. 8–23. [Viitattu 24.5.2017]. DOI:10.1016/j.agrformet.2016.05.005. ISSN 0168–1923.

Zheng, G., Moskal, L.M., & Soo-Hyung, K., 2013. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. [Verkkolehti]. Vol. 51:2. S. 777–786. [Viitattu 17.5.2017]. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2205003. ISSN: 0196–2892.